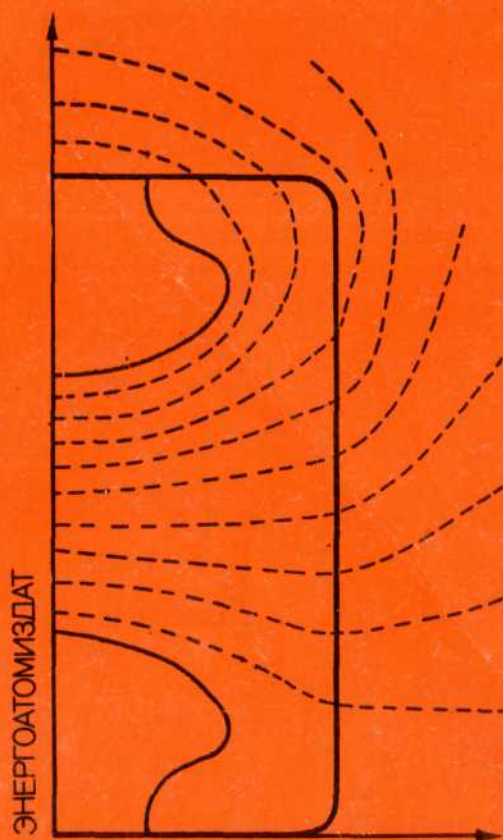


Л.Д. ГИНЗБУРГ



ТВЕРДАЯ  
ИЗОЛЯЦИЯ  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ  
ВНУТРЕННИХ  
УСТАНОВОК

Л. Д. ГИНЗБУРГ

---

ТВЕРДАЯ  
ИЗОЛЯЦИЯ  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ  
ВНУТРЕННИХ  
УСТАНОВОК



---

Санкт-Петербург  
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ  
Санкт-Петербургское отделение  
1992



ББК 31.241  
Г49  
УДК 621.3.048.81.001.5

Рецензент *А. А. Абрамов*

**Гинзбург Л. Д.**

Г49 Твердая изоляция высоковольтных конструкций внутренних установок. — СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отделение, 1992. — 274 с.: ил.  
ISBN 5-283-04504-8

Рассмотрены теоретические и экспериментальные принципы разработки систем изоляции высоковольтных трансформаторов, катушек индуктивностей, изоляторов, выключателей, замыкателей, реле и других элементов и устройств электро- и радиотехнических установок. Приводятся экспериментальные и практические материалы, необходимые для оптимальной реализации в конструкциях электрофизических, физико-механических и технологических свойств твердой изоляции.

Для инженерно-технических работников, занятых исследованием, разработкой, производством и эксплуатацией изоляционных конструкций электротехнических установок.

Г  $\frac{220205000-107}{051(01)-92}$  52—91

**ББК 31.241**

ISBN 5-283-04504-8

© Л. Д. Гинзбург, 1992

Несмотря на все возрастающее применение в народном хозяйстве радиотехнической и электротехнической аппаратуры технологического, медицинского, исследовательского и другого назначения, повышения ее мощности и напряжения, в отечественной и зарубежной литературе практически отсутствуют работы по проектированию и исследованию систем твердой изоляции оптимизированных по массогабаритным характеристикам высоковольтных изоляционных конструкций — трансформаторов, дросселей, изоляторов, реле, выключателей, переключателей и вариометров для аппаратуры внутренней установки стационарных и передвижных устройств.

Это приводит к использованию в установках токов высокой частоты, в рентгеновской аппаратуре и аппаратуре лучевых методов лечения, в мощных исследовательских генераторах и в другой радиотехнической аппаратуре больших по габаритам и массе изоляционных конструкций общепромышленного изготовления, рассчитанных на эксплуатацию в мощных энергетических устройствах с перенапряжениями и перетоками больших кратностей. Применение таких конструкций неоправданно увеличивает габариты и массу самой радиотехнической аппаратуры, увеличивает материалоемкость и трудоемкость, энергетические расходы при изготовлении и эксплуатации, ухудшает технические и экономические характеристики аппаратуры. Помимо перечисленных имеют место специфические требования, предъявляемые к радиотехнической аппаратуре новых поколений по условиям эксплуатации и производства, что приводит к необходимости разработки новых изоляционных конструкций.

Книга должна устранить имеющийся пробел в освещении теоретических и экспериментальных принципов проектирования оптимизированных изоляционных конструкций внутренней установки на твердой изоляции с заданным запасом электрической и механической прочности для электро- и радиотехнической аппаратуры.

Теоретические и практические проблемы проектирования рассмотрены с учетом взаимозависимости процессов электрического и механического разрушения твердой изоляции. Уделено внимание нарушению сплошности изоляции в виде трещин и отслоений под воздействием термоупругих напряжений. Учитывается влияние адгезионных свойств на конструкцию. Возникновение термоупругих напряжений объясняется наличием монолитной связи конструкционных и изоляционных материалов с разными значениями температурных коэффициентов линейного расширения, модуля Юнга, коэффициента Пуассона и температурными градиентами в изоляции.

В работе показано, что характеристики системы изоляции обуславливают выбор типа конструкции, габаритов, массы и

качества изоляционной конструкции.

Оптимизация системы изоляции конструкции решается с применением пакета прикладных программ на ЭВМ единой серии.

В работе обосновывается выбор системы изоляции и технологических параметров электроэлементов в зависимости от электрофизических и физико-механических свойств твердых полимерных материалов и керамики. Предлагаются простые в технологическом отношении способы выравнивания электрических полей, снижения термоупругих напряжений и повышения адгезионной прочности изоляции для основных типов твердых изоляционных материалов.

Применение теоретически и экспериментально обоснованных методов проектирования и расчета повышает вероятность достижения заданных показателей сразу на стадии изготовления образцов и возможность получать гарантированные запасы электрической и механической прочности в готовых изделиях. Проектирование изоляционных конструкций промышленной и высокой частоты иллюстрируется большим количеством примеров. Рассмотрены конструктивные и технологические особенности предлагаемых решений и дан сравнительный анализ массогабаритных и других технических характеристик.

В книге рассмотрено следующее:

условия эксплуатации систем изоляции на промышленной и высокой частоте;

изоляционные, конструкционные и технологические свойства твердой изоляции;

пробой в воздухе и поверхностный пробой для стационарных и переходных процессов эксплуатации во всем диапазоне частот;

теоретические и экспериментальные принципы проектирования с учетом применения современной вычислительной техники; выравнивание электрических полей и снижение термоупругих напряжений;

проектирование систем изоляции высоковольтных и высокочастотных трансформаторов и дросселей;

проектирование систем изоляции высоковольтных и высокочастотных изоляторов, переключателей, реле, катушек индуктивности и других изоляционных конструкций.

Книга рассчитана на специалистов, занимающихся разработкой изоляционных конструкций для радио- и электротехнической аппаратуры. Разделы, относящиеся к определению влияния электрофизических и физико-механических свойств твердых диэлектриков на проектирование и технологию изготовления, на способы выравнивания электрических полей и снижения термоупругих напряжений, на разработку критериев оптимизации, методов использования ЭВМ и на использование новых конструктивно-технологических принципов, найдут применение при

создании любых изоляционных конструкций внутренней установки.

Приведенная информация основана на более чем тридцатилетнем опыте исследований и разработок автора и его коллег, в том числе и из других научно-исследовательских организаций и вузов страны.

Автор благодарит своих многолетних сотрудников Р. С. Ибрагимова, И. И. Кожевникова, А. С. Левашева, Ю. М. Мурова, Е. В. Кирюкову, Е. П. Лазовскую и других, творческое участие которых в совместной повседневной работе способствовало появлению этой книги, а также известных специалистов в области электрофизики М. А. Аронова, М. Х. Айтса, Л. Д. Бобровскую, А. А. Жукова, М. П. Кокуркина, К. Н. Кана, К. Ф. Куду, А. Ф. Николаевича, Т. Н. Тарасову, сотрудничество с которыми было не только весьма плодотворным, но и приятным.

Параграф 3.2 книги написан совместно с Е. В. Кирюковой.

*Автор*

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

### УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ

#### 1.1. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ВНУТРЕНнюю ИЗОЛЯЦИЮ

Изоляционные конструкции (ИК) в силовой и радиотехнической аппаратуре применяются в высоковольтных источниках питания переменным и постоянным током, в генераторных, в усилительных устройствах, выходных контурах, антенно-фидерных трактах и в других устройствах.

В течение заданного срока службы ИК испытывают электрические, тепловые, механические и климатические воздействия, которые ускоряют процессы старения твердой изоляции или могут практически мгновенно вывести ее из строя.

Электрические нагрузки обусловлены длительно приложенным рабочим напряжением и возникающими при эксплуатации переходными процессами и перенапряжениями. При нормальной работе для силовых установок и радиотехнической аппаратуры напряжением до 200 кВ перенапряжения с вероятностью 0,001 не превышают кратности 2,1 номинального, т. е. примерно  $2U_{ном}$ . Это связано с особенностями системы защиты для каждого из типов электрических устройств.

Внутренние перенапряжения возникают при коммутационных, аварийных и других переходных режимах.

Сложная радиотехническая аппаратура может содержать генераторы незатухающих и модулированных колебаний, в которых изоляция подвергается воздействию непрерывных переходных процессов в различных диапазонах частот.

Помимо переходных режимов при нормальной коммутации, в радиотехнической аппаратуре возникают неконтролируемые переходные явления, связанные с паразитными наводками, когда напряжение передается из одного устройства или его части в другое, не предусмотренное его схемой и конструкцией.

Такие помехи возникают вследствие непредсказуемой связи между ними по электрическим цепям. Чаще всего помехи возникают при настройке и регулировке сложной аппаратуры.

Паразитные наводки приводят к появлению на выходе элемента напряжений и токов, не соответствующих его основным режимам [1].

Изоляционные конструкции на основе твердых диэлектриков, применяемых в силовой и радиотехнической аппаратуре, в зави-



сности от условий эксплуатации могут находиться под напряжением переменного 50 Гц, постоянного, тока высокой частоты, импульсного и смешанного напряжений, когда на постоянное накладывается высокочастотная переменная составляющая.

Источники питания постоянного тока имеют на выходе выпрямителя такие значения пульсации, которые могут повлиять на образование частичных разрядов внутри изоляции (ЧР) или поверхностных частичных разрядов (ПЧР) и на ускоренное старение полимерной изоляции. Требование независимости срока службы и надежности работы высоковольтной ИК от воздействия ЧР обеспечивается при их отсутствии во время эксплуатации.

Напряжение появления ЧР ( $U_0$ ) равно напряжению на устройстве, при котором хотя бы на одной из силовых линий электрического поля комбинированной изоляции выполняется условие самостоятельности разряда в воздухе.

В реальных высоковольтных ИК частичные разряды образуются в раковинах, порах, трещинах, отслоениях внутри изоляции или на отдельных участках комбинированной изоляции, где повышена напряженность электрического поля. Эти участки находятся между электродами и границей раздела твердой и газовой изоляции. Особенно часто ПЧР возникает в области газового клина.

Наиболее сложное влияние испытывает изоляция в РТА, электроэлементы которых подвергаются одновременному воздействию электрических и тепловых нагрузок, электродинамических ударов и термоупругих напряжений (ТУН). Термоупругие напряжения при механическом нарушении сплошности, например, литой изоляции, могут привести к электрическому разрушению и пробую.

Влияние электрической, тепловой нагрузок и внутренних механических напряжений, а также внешних климатических и механических условий способствует постепенному старению изоляции, накоплению в ней макро- и микродефектов, приводящих к разрушению.

В радиоэлектронных и силовых схемах применяются высоковольтные и высокопотенциальные трансформаторы.

К высоковольтным трансформаторам относятся анодные, модуляционные, низкочастотные, импульсные, измерительные и другие трансформаторы напряжения, понижающие и повышающие силовые трансформаторы с большой разницей напряжения между началом и концом обмотки. Такие же условия эксплуатации изоляции в зарядных, модуляционных и других типах дросселей.

Высокопотенциальные трансформаторы используются в качестве накальных, поджигающих, сеточных, пиковых, измерительных трансформаторов тока, характеризуются большим (1... 200 кВ) потенциалом относительно «земли» и небольшой

разницей напряжений на обмотке.

Для трансформаторов, дросселей и других изоляционных конструкций эпоксидная изоляция нашла наибольшее применение в изделиях, работающих при фиксированных частотах до  $2 \dots 3$  кГц и звуковых частотах до 10 кГц для мощностей до 100 кВ·А. Зарубежные фирмы (например, «Вестингауз», «Дженерал Электрик» и др.) рекламируют силовые трансформаторы с эпоксидной изоляцией мощностью 630 кВ·А и выше.

В процессе эксплуатации между двумя установившимися режимами с постоянными амплитудами токов и напряжений лежит переходный период, в течение которого могут происходить их скачки. Продолжительность этих периодов невелика и измеряется милли- или микросекундами. Но отсутствие предупредительных или ограничительных мер в схеме эксплуатации и в конструкции изделия может привести к преждевременному выходу из строя или частичному нарушению сплошности изоляции. Все виды стационарных и переходных процессов на входе и выходе трансформаторов и дросселей воздействуют на системы изоляции изоляторов, выключателей и других высоковольтных конструкций данной схемы.

Учитывая сложность, а иногда и невозможность создания трансформаторов, дросселей и других изоляционных конструкций, способных выдерживать многократные перегрузки по току и напряжению, следует при разработке определять максимальные значения перенапряжений и токов короткого замыкания.

1.1.1. Эксплуатация трансформаторов и дросселей в схемах выпрямителей.

**Стационарный режим.** Значение напряжения и пульсации в анодных высоковольтных трансформаторах зависит от схемы выпрямления.

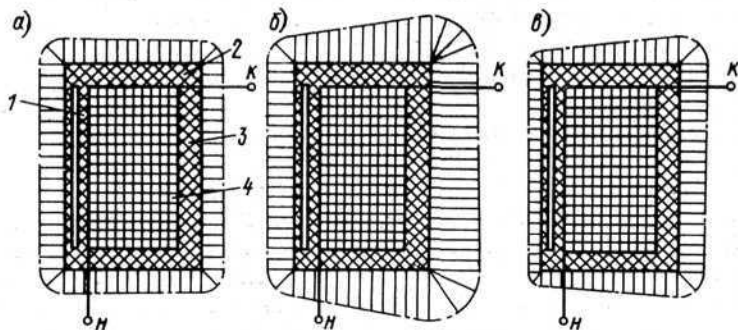
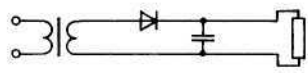

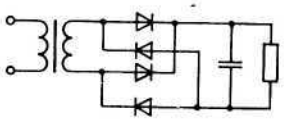
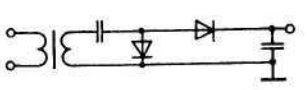
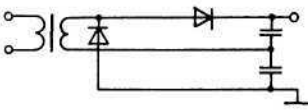
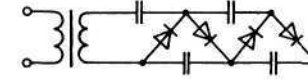
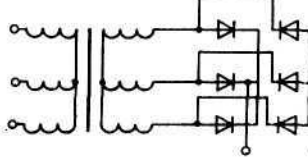


Рис. 1.1. Эпюры напряжений, воздействующих на главную изоляцию трансформаторов, в схемах первой (а), второй (б) и третьей (в) групп выпрямителей

1 — изоляция между экраном и обмоткой ВН; 2 — изоляция на торцевой части катушки; 3 — наружный слой изоляции обмотки ВН; 4 — обмотка ВН; н — начало; к — конец обмотки

По характеру воздействия напряжения на изоляцию эти схемы могут быть представлены тремя основными группами (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Группа	Схема	Тип схемы
1		Однофазная
		Двухфазная
		Двухфазная мостовая
		Удвоения
2		Удвоение напряжения (Латурна)
3		Каскадное умножение напряжения
		Трехфазная двухполупериодная (Ларионова)

В трансформаторах первой и третьей групп напряжение синусоидальное, во второй группе — однополярное пульсирующее. При одинаковом по значению индуцированном напряжении распределение напряжения в зависимости от вида схемы будет неравномерным. Распределения напряжения в изоляции иллюстрирует рис. 1.1.

Как следует из эпюры распределения напряжений, в трансформаторах первой группы на главную изоляцию высоковольтных обмоток воздействует полное переменное напряжение.

Для трансформаторов второй группы при подключении начала обмотки к генератору изоляция ВВ-обмотки относительно

экрана испытывает воздействие пульсирующего напряжения, равного по амплитуде индуцированному. На торцевую часть изоляции и на ее наружный слой действует пульсирующее напряжение с удвоенной амплитудой.

В трансформаторах третьей группы, при заземленном начале обмотки, на изоляцию высоковольтной обмотки относительно экрана воздействует напряжение, равное разности напряжения на первом слое обмотки, а на ее торцевую часть и на наружный слой — полное рабочее напряжение обмотки.

Изоляция высокопотенциальной обмотки накальных, поджигающих, сеточных и других трансформаторов, находящихся под потенциалом анодной группы вентиляей, испытывает воздействие полного синусоидального напряжения, а изоляция трансформаторов катодной группы вентиляей и дросселей фильтров — выпрямленного пульсирующего напряжения.

Если в высокопотенциальном трансформаторе разность напряжения на вторичной обмотке соизмерима с потенциалом относительно земли, то рабочее напряжение внутренней изоляции определяется из выражения

$$U_p = kU_{=} + U_{\sim}, \quad (1.1)$$

где  $U_{=}$  и  $U_{\sim}$  — постоянная и амплитудная переменная составляющие напряжения, а  $k = 0,5$ ;

для внешней изоляции

$$U_p = U_{=} / \sqrt{2} + U_{\sim}. \quad (1.2)$$

**Переходные режимы.** Переходные процессы в трансформаторах и дросселях могут вызвать следующие изменения электрических характеристик, способных оказать вредное воздействие на изоляцию:

а) небольшие периодические увеличения напряжения, приводящие к появлению частичных разрядов, для поддержания которых требуется меньшая напряженность электрического поля, чем для их поджига;

б) изменения частоты и формы кривой напряжения, которые ускоряют процессы старения;

в) импульсные перенапряжения, способные привести к пробоем или серьезному повреждению изоляции;

г) длительный перегрев обмотки и связанное с ним ускоренное старение изоляции (см. рис. 1.2);

д) короткие замыкания и как следствие — электродинамические удары или термические воздействия на изоляцию; из-за быстрого перепада температур возможны появления значи-

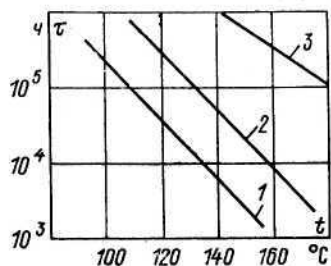


Рис. 1.2. Зависимость срока службы изоляции от температуры для основных классов изоляции

1 — 105 °С; 2 — 130 °С; 3 — 170 °С

тельных деформаций в изоляции за счет разных значений температурных коэффициентов линейного расширения материала обмотки и изоляции.

Возможны и другие виды воздействий и их комбинаций на изоляцию.

Переходные процессы в трансформаторах при синусоидальном напряжении описываются уравнением

$$L(di/dt) + ir = U_1 \sin(\omega t + \alpha), \quad (1.3)$$

где  $i$  — мгновенное значение тока.

Ток при переходных процессах имеет установившуюся и аperiodическую составляющие. Последняя затухает с постоянной времени  $\tau = L/r$ , где индуктивность  $L$  соответствует потоку рассеяния. Затухание переходных процессов происходит также вследствие токов Фуко.

Переходные процессы могут вызываться внешними, например атмосферными, явлениями или возникать вследствие нарушения работы схемы, в которую включен трансформатор.

*Переходные процессы на стороне первичной обмотки.* Высоковольтные анодные трансформаторы мощностью до 100 кВ·А имеют напряжение на первичной стороне 220...380 В и, как правило, хорошо защищены от внешних (атмосферных) перенапряжений.

Для таких трансформаторов переходные процессы, способные повлиять на изоляцию, могут возникать при включении в сеть на холостом ходу или при коротких замыканиях. Характер протекания переходных процессов будет зависеть от схемы выпрямителя.

Однополупериодное выпрямление однофазного переменного тока в современных установках применяется редко. В таких схемах из-за наличия значительной постоянной составляющей возникает подмагничивание магнитопровода, что приводит к специфическому протеканию переходных процессов.

Для трехфазных выпрямителей характерной особенностью является наличие значительных высших гармонических составляющих первичного тока.

Работа трансформатора в режиме холостого хода может привести к быстрому возрастанию намагничивающего тока и к перенапряжению на высоковольтной обмотке. Эти кратковременные пусковые токи продолжаются не более нескольких периодов и обычно не представляют опасности для изоляции. Но если пуск происходит в момент перехода напряжения через нуль, то магнитный поток трансформатора содержит периодическую и аperiodическую составляющие, а максимальная амплитуда переходного тока достигает почти двойного значения по сравнению с амплитудой установившегося потока.

В трехфазном трансформаторе с сетевой обмоткой, соединенной в треугольник, каждая фаза независимо включена в



сеть. Максимальное значение потока будет иметь место только в одной фазе, где напряжение в момент включения проходит через нуль.

Известную опасность для обмотки и изоляции представляют электромагнитные силы взаимного притяжения, возникающие при пусковых токах между витками первичной обмотки. Однако в монолитных конструкциях, залитых эпоксидным компаундом, этими силами можно пренебречь.

Перенапряжения, возникающие в высоковольтной обмотке при включении ненагруженного трансформатора, могут оказать разрушающее влияние на продольную изоляцию. Особая опасность возникает в анодных трансформаторах, содержащих большое число витков тонкого провода диаметром до 0,2... 0,3 мм. Возможные в этих случаях нарушения межвитковой изоляции могут привести к созданию короткозамкнутых витков, локальному перегреву и к появлению трещин в главной изоляции или отслоению ее от обмотки. При продолжительном коротком замыкании может наступить деструкция компаунда и пробой.

Значительные механические разрушения являются следствием больших градиентов температурного поля в твердом диэлектрике из-за разности температур в очаге короткозамкнутых витков и на периферии. При этом с увеличением объема катушки и ее изоляции возрастают механические напряжения и разрушения в ней.

Ток виткового замыкания  $I_{2\text{к.з}}$  может быть определен из выражения

$$I_{2\text{к.з}} = I_{2\text{ном}} (100/U_{\text{к.з}}) (\omega_2/\omega_{2\text{к.з}}), \quad (1.4)$$

где  $I_{2\text{ном}}$  — номинальный ток обмотки;  $U_{\text{к.з}}$  — напряжение короткого замыкания;  $\omega_2$  — число витков обмотки;  $\omega_{2\text{к.з}}$  — число короткозамкнутых витков.

При коротком замыкании на стороне сетевой обмотки анодного трансформатора ток короткого замыкания достигает своего максимального значения приблизительно через полпериода и может быть определен из выражения

$$I_{1\text{к.з}} = 1,41 I_{1\text{у}} \{1 + \exp[-r_{\text{к.з}}/x_{\text{к.з}}\pi]\}, \quad (1.5)$$

где  $I_{1\text{у}} = U_1/Z_{\text{к.з}}$  — установившийся ток короткого замыкания;  $U_1$  — напряжение сетевой обмотки;  $r_{\text{к.з}}$ ,  $x_{\text{к.з}}$  и  $Z_{\text{к.з}}$  — соответственно активное, реактивное и полное сопротивление обмотки при коротком замыкании.

Электродинамические силы, возникающие в осевом направлении при коротких замыканиях, представляют особую опасность при неодинаковой высоте сетевой и высоковольтной обмоток. Из-за искривления магнитных линий поля появляются дополнительные электромагнитные силы, которые могут деформировать обмотку. Такие явления при глухом коротком замыкании во взаимодействии с джоулевыми потерями в обмотке и

с учетом уменьшения механической прочности компаунда при температуре выше  $80 \dots 90^\circ \text{C}$  могут привести к механическому разрушению изоляции.

При коротком замыкании исследуется также термическое воздействие на изоляцию и обеспечивается такое время срабатывания системы защиты, которое гарантировало бы кратковременный нагрев изоляции не выше  $200 \dots 250^\circ \text{C}$ .

*Переходные процессы на стороне вторичной обмотки.* В схеме выпрямителя, т. е. на стороне высоковольтной обмотки анодного трансформатора, возможны явления, вызванные зажиганием в ламповых вентилях обратных токов или пробоями в полупроводниковых приборах. Систематически возникают перенапряжения в режиме нормальной коммутации при зажигании очередного вентиля.

Расчет установившегося значения тока короткого замыкания в анодной обмотке может быть произведен аналогично расчету симметричного короткого замыкания на вторичных обмотках обычного силового трансформатора. Форма кривой анодных токов при коротком замыкании близка к синусоиде, а длительность их равна полупериоду. Нарастание тока до своего конечного значения происходит со скоростью, обратно пропорциональной индуктивности цепи короткого замыкания, а максимальные значения достигаются весьма редко, так как между замыкающимися проводами при прохождении напряжения через максимум или вблизи него возникает дуга, которая и является коротким замыканием.

Характер воздействия короткого замыкания на изоляцию не отличается от воздействия на первичную обмотку трансформатора. Зажигания в газонаполненных вентилях вследствие обратных токов могут быть вызваны нарушением температурного режима, перегрузками, короткими замыканиями, ухудшением вакуума и т. д.

В выпрямителях, работающих по трехфазной двухполупериодной схеме Ларионова, при обратном зажигании в одном из вентилях ток в обратной проводящей фазе превышает в несколько раз фазные токи в двух других фазах. Последние, в свою очередь, превышают токи при симметричном коротком замыкании фаз.

Кроме того, появляется большая постоянная составляющая, которая не может трансформироваться в первичную обмотку. Это приводит к нарушению баланса намагничивающих сил в обеих обмотках и при возникших токах вызывает резкое возрастание электродинамических усилий, действующих на обмотки в осевом направлении. Эти усилия могут привести к нарушению монолитности обмоток, залитых эпоксидным компаундом. При неустойчивых режимах выпрямителя наблюдаются периодические изменения тока, происходящие с большой частотой. Для выпрямителей, собранных по трехфазной схеме

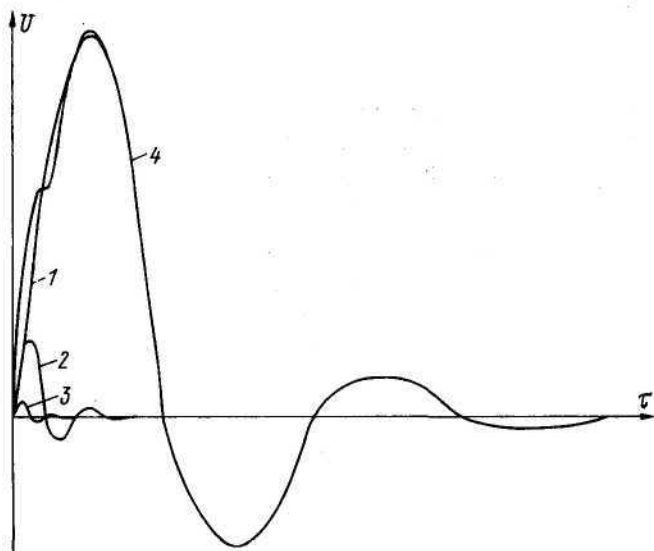


Рис. 1.3. Кривая коммутационных перенапряжений трехфазного двухполупериодного выпрямителя на газотронах  
 $1 - U_1 \exp(-\alpha_1 t) \sin \omega_1 t$ ;  $2 - U_2 \exp(-\alpha_2 t) \sin \omega_2 t$ ;  $3 - U_3 \exp(-\alpha_3 t) \sin \omega_3 t$ ;  $4 -$  результирующая

Ларионова, были найдены три типа колебаний с частотой 9, 4,5 и 2 кГц.

При наличии в схеме распределенных параметров  $R$ ,  $L$ ,  $Z$  может возникнуть резонанс напряжений, сопровождающийся перенапряжениями.

Таким образом, перенапряжения в выпрямителях имеют характер или кратковременных электрических импульсов или периодических волн.

Значительная часть перенапряжения (до 30...40%) может падать на первой секции обмотки. Перенапряжения, которые происходят в результате нормальной коммутации, не превосходят двойного значения номинального напряжения, но для большинства схем они на 10...20% выше номинального.

В некоторых аварийных режимах эти колебания могут привести к перенапряжениям, приближающимся к (2,5...3)-кратному рабочему напряжению. По некоторым данным возможны перенапряжения, превосходящие в 10 раз амплитуду номинального напряжения.

При исследовании коммутационных перенапряжений в выпрямителях на 30 кВ, собранных по трехфазной двухполупериодной схеме Ларионова, было определено, что они представляют собой трехчастотную кривую, которая может быть выражена уравнением

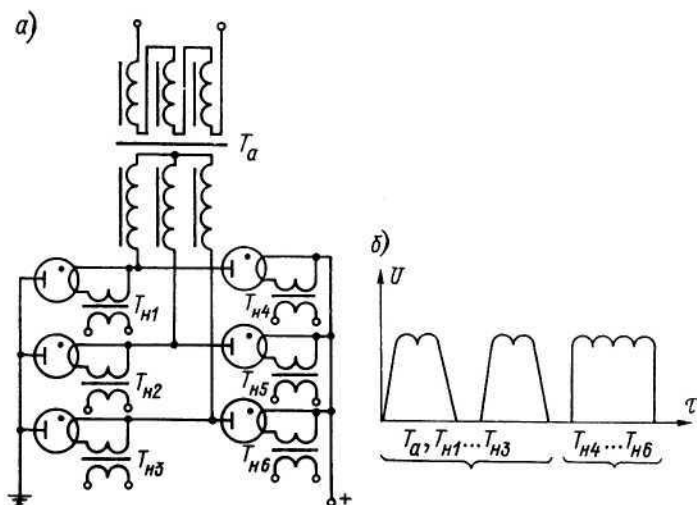


Рис. 1.4. Трехфазная двухполупериодная схема выпрямителя (а) и форма кривых напряжения, приложенного к главной изоляции и анодного  $T_a$  и накаливого  $T_n$  трансформаторов (б)

$$U_n = U_1 \exp(-\alpha_1 t) \sin \omega_1 t + U_2 \exp(-\alpha_2 t) \sin \omega_2 t + U_3 \exp(-\alpha_3 t) \sin \omega_3 t, \quad (1.6)$$

где

$$\begin{aligned} U_1 &= 25 \text{ кВ}; & f_1 &= 2 \text{ кГц}; & \alpha_1 &= 4,6 \cdot 10^3; \\ U_2 &= 5 \text{ кВ}; & f_2 &= 10 \text{ кГц}; & \alpha_2 &= 2,3 \cdot 10^4; \\ U_3 &= 1 \text{ кВ}; & f_3 &= 20 \text{ кГц}; & \alpha_3 &= 4,6 \cdot 10^4. \end{aligned}$$

Кривая, построенная по данному уравнению, представлена на рис. 1.3.

Все перечисленные виды перенапряжений будут действовать и на изоляцию высокопотенциальных накаливых, сеточных и поджигающих трансформаторов, включенных в анодную или катодную цепь выпрямителя (рис. 1.4).

Имеющиеся статистические данные свидетельствуют о возможности возникновения значительного числа воздействий аварийных и коммутационных перенапряжений, которые возникают при оперативных и защитных отключениях. Особенно большим перегрузкам изоляция подвергается в период настройки и регулировки выпрямителя и генератора.

Важное значение для условий эксплуатации изоляции трансформаторов имеет применение электронных схем защиты выпрямителей от перегрузок и КЗ, заменивших в настоящее время релейные системы.

На рис. 1.5 показано изменение напряжения относительно земли в точке высоковольтной обмотки для трех, наиболее распространенных волн перенапряжений в трансформаторах.

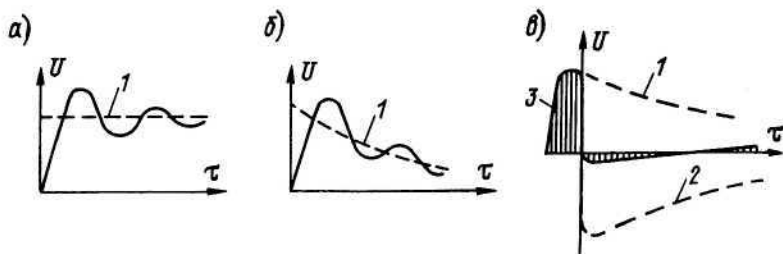


Рис. 1.5. Изменение напряжения относительно земли в точке обмотки при прямоугольной бесконечно длинной волне — а, при аperiодической волне конечной длины — б и при образовании срезанной волны (кривая 3) в результате наложения двух волн разных знаков (кривые 1 и 2) — в (заштрихованная область — результирующая)

В обмотках с незаземленным концом возникает отражение волны со значительным увеличением ее амплитуды, а в обмотках с заземленным концом — максимальное напряжение относительно земли снижается и колебания затухают соответственно постепенному снижению напряжения на зажимах обмотки (рис. 1.6 и 1.7).

При возникновении перенапряжений опасные по значению напряжения могут возникнуть как для главной, так и для продольной изоляции. Наибольшая угроза возникает для изоляции первых витков и секций в момент начального распределения на-

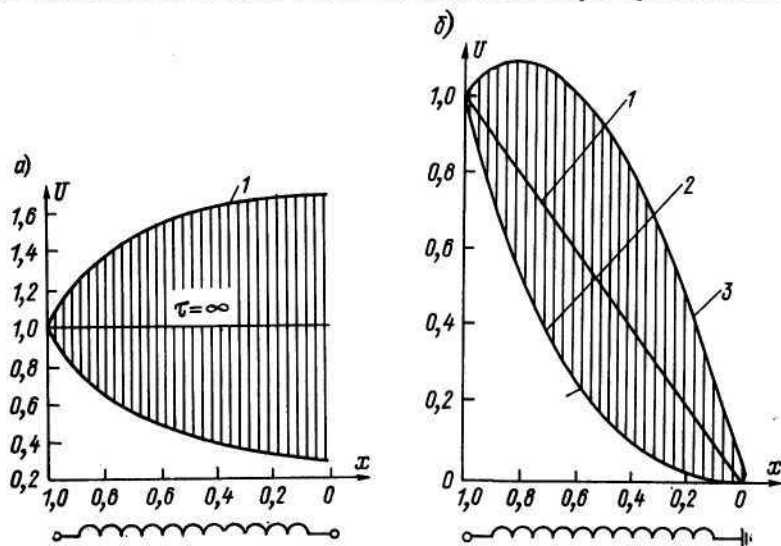


Рис. 1.6. Распределение напряжения в переходном режиме вдоль обмотки трансформатора с изолированным (а) и с заземленным (б) концами  
1 — огибающая наибольшего напряжения; 2 —  $\tau = \infty$ ; 3 —  $\tau = 0$



пряжения при срезанной волне (рис. 1.5, в), которую можно рассматривать как наложение двух аperiодических волн разных знаков.

Защита от перенапряжений, не предусмотренных изоляцией трансформатора, осуществляется установкой разрядников, исключающих воздействие на обмотку волн с амплитудой, превышающей допустимую для выбранной изоляции. В самой конструкции катушки предусматривают выравнивание картины электрического поля, т. е. более равномерное распределение напряженности поля в объеме изоляции.

В дросселях фильтров, имеющих большое сопротивление обмотки, процессы установления тока и напряжения при включении являются аperiодическими. Соответственно перенапряжения при этом невелики.

В мощных выпрямителях, особенно с Г-образным фильтром, при включениях и резких изменениях нагрузки могут возникать значительные перенапряжения, которые наиболее опасны для начальных витков обмотки.

При включении и отключении выпрямителя в обмотке дросселя возникают волны перенапряжений с фронтами порядка десятков или сотен микросекунд. Максимальные значения перенапряжений превышают номинальное значение в 2,0...2,5 раза.

Угрозу для разрушения продольной изоляции дросселя фильтра высоковольтного выпрямителя представляет режим короткого замыкания в сети нагрузки. В этом случае напряжение скачкообразно изменяется от рабочего до нуля. Фронт воздействующей волны для каждой схемы будет определяться скоростью коммутации при срабатывании аппаратуры защиты и значениями распределенных параметров  $R$ ,  $L$ ,  $Z$  схемы.

Экспериментально определено, что перераспределение по обмотке перенапряжения  $U_n$  происходит только в дросселях с большим числом (несколько тысяч) витков. При небольшом числе (до нескольких сотен) витков перенапряжение распределяется почти равномерно. На рис. 1.7 показано изменение межслоевого перенапряжения  $U_{n,сл}$  на различных участках обмотки. Зависимости построены в относительных единицах для дросселей с числом витков  $10^2$  (кривая 1) и  $10^3$  (кривая 2).

### 1.1.2. Эксплуатация трансформаторов тока и напряжения.

Трансформаторы тока предназначены для работы в высоковольтных сетях. Внутренняя и внешняя изоляция трансформаторов определяется исходя из условия последовательного включе-

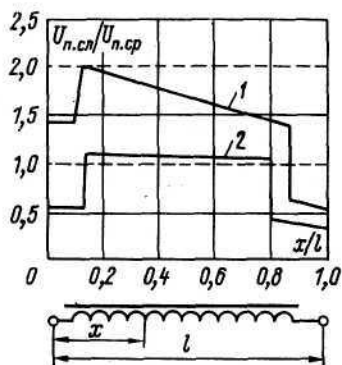


Рис. 1.7. Распределение межслоевого перенапряжения по обмотке дросселя

ния первичной обмотки в высоковольтную цепь. Нагрузкой для вторичной обмотки являются измерительные приборы, катушки реле защиты и другие низковольтные приборы. Первичная обмотка изолирована от вторичной и от земли на полное рабочее напряжение.

Продольная изоляция первичной обмотки при номинальном режиме работы трансформаторов подвергается воздействию синусоидального напряжения сети. Разность напряжений на зажимах первичной обмотки трансформатора может быть определена из выражения  $U_{1н} = I_{1н} Z_1 = I_{1н} \omega L_1$ , где  $L_1$  — полная индуктивность первичной обмотки.

Значение индуктивности первичных обмоток трансформаторов тока в зависимости от тока и напряжения сети может колебаться от единиц до десятков тысяч микрогенри.

Витковое напряжение вторичных обмоток определяется из уравнения  $U_{2н} = (Z_2/\omega_2) I_{2н}$ , где  $Z_2$  — полное внутреннее сопротивление вторичной обмотки.

Одной из особенностей трансформаторов тока является работа их в условиях, близких к короткому замыканию.

Перенапряжения в первичной обмотке возникают в результате атмосферных явлений и в коммутационных режимах, а во вторичной — при ее размыкании, когда первичная обмотка находится под током (режим холостого хода).

Волны коммутационных перенапряжений, как правило, имеют меньшую крутизну фронта, чем при атмосферных перенапряжениях. Выбор изоляции и способа защиты от перенапряжений трансформатора производят исходя из наихудших условий, т. е. при атмосферных воздействиях. Тогда амплитуда волны перенапряжения  $U_{1н}$ , при незначительной емкости трансформатора, будет определяться выражением  $U_{1н} = k_{\phi} L / Z_{в} \exp[-2Z_{в}/(Lt)]$ , где  $k_{\phi} = U/\tau$  — крутизна фронта волны, В/с;  $Z_{в}$  — волновое сопротивление линии.

Протекание процесса зависит от постоянной времени  $\tau = L/(2Z_{в})$ .

При более медленном нарастании напряжения, т. е. при большом значении  $\tau_{п}$ , вероятность достижения максимального значения фронта волны уменьшается.

Максимальное значение напряжения на зажимах первичной обмотки появляется, когда  $U_{1н\max} = k_{\phi}(L/Z_{в})$ .

Перенапряжения во вторичной обмотке возможны в результате насыщения магнитопровода в момент короткого замыкания на первичной стороне трансформатора. Максимальное значение этого перенапряжения определяется из выражения  $U_{2п\max} = (\mu\sqrt{2}S_{ж}/l_{м})f\omega_2^2 I_{2\text{ном}}$ , где  $\mu$  — магнитная проницаемость стали;  $S_{ж}$  — активное сечение стали магнитопровода;  $l_{м}$  — средняя длина магнитного пути;  $f$  — частота пульсации;  $\omega_2$  — число витков вторичной обмотки;  $I_{2\text{ном}}$  — номинальный ток вторичной обмотки.

Воздействие электродинамических сил на эпоксидную изоляцию трансформаторов при коротких замыканиях, как правило, можно не учитывать вследствие меньшего, по сравнению с механической прочностью компаунда, значения продольной составляющей этих сил.

Значительно большую опасность для любой эпоксидной изоляции представляют термоупругие напряжения, возникающие в результате быстрого нагревания обмотки при коротком замыкании, и возможность ее чрезмерного перегрева.

Учитывая необратимый характер термических воздействий на твердую изоляцию в трансформаторах тока, определяется максимальная допустимая температура перегрева при заданной длительности короткого замыкания. Продолжительность его зависит от времени срабатывания защиты и термической стойкости изоляции ( $100 \dots 250^\circ \text{C}$ ).

Принимают во внимание изменения электрической и механической прочности изоляции при указанных температурах.

Измерительные трансформаторы напряжения по условиям эксплуатации отличаются от силовых высоковольтных тем, что сопротивление нагрузке в них обычно значительно превосходит их сопротивление короткого замыкания, так что трансформаторы напряжения работают в режиме, близком к режиму холостого хода.

1.1.3. Эксплуатация трансформаторов и дросселей в усилителях низкой частоты.

В усилителях низкой частоты и модуляционных устройствах трансформаторы работают в диапазоне от единиц (десятков) Гц — область низших частот — до  $10 \dots 15$  кГц — область высших частот. Преобладающими по времени воздействия на изоляцию являются частоты до  $2 \dots 5$  кГц. Экспериментальные исследования и многолетняя практика показали, что эпоксидная изоляция и элементы из стеклоэпоксидных материалов надежно эксплуатируются в этом диапазоне частот.

Мощные усилители установок ТВЧ, трансляционных и радиопередающих устройств, в которых наиболее часто применяются высоковольтные трансформаторы низкой частоты, большей частью работают по двухтактной схеме в режиме «В». Эти так называемые модуляционные трансформаторы имеют выведенную среднюю точку.

Для улучшения частотной характеристики, с целью уменьшения индуктивности рассеяния, первичную и вторичную обмотки модуляционных высоковольтных трансформаторов разбивают на четыре, шесть или более симметричных частей, размещают на двух кернах и соединяют по специальной схеме.

Главная изоляция в таких трансформаторах подвергается воздействию высокой разности напряжений частотой до  $10 \dots \dots 15$  кГц, соответствующей напряжениям между отдельными частями первичной и вторичной обмоток с учетом постоянной

составляющей. Принимаются во внимание как частота основной нагрузки, так и возможные кратковременные периоды работы в области высших частот, в течение которых не исключены явления теплового пробоя. Колебания напряжения, частотная и тепловая нагрузка на изоляцию зависят от характера работы передающего устройства, которое может эксплуатироваться в телеграфном режиме или в режиме передачи музыки и речевого сигнала. Наконец, имеет значение, какая передается музыка. От этого, в частности, зависит частотный диапазон и нагрузочная характеристика трансформатора.

При телеграфной нагрузке модуляционный трансформатор работает фактически в режиме непрерывных переходных процессов, которые являются наиболее тяжелыми для изоляции в электрическом и механическом отношениях.

Переходные процессы в модуляционных трансформаторах определяются малыми значениями индуктивности рассеяния своих обмоток и низкой рабочей индукцией, которая возникает при работе в области высших частот [3].

В модуляционных дросселях, так же как и в модуляционных трансформаторах с подмагничиванием, принимается во внимание суммарное воздействие на изоляцию постоянной и переменной составляющих нагрузки и большое падение напряжения на первых витках обмотки в момент включения дросселя.

#### 1.1.4. Катушки индуктивности и вариометры.

В качестве элементов дискретной настройки выходных контуров широко применяются каркасные катушки индуктивности с цилиндрической или спиральной намоткой высокочастотными проводами марки ЛЭЛОР с шелковой или лавсановой изоляцией в виде оплетки, рассчитанной на напряжение 500 В.

В последние годы каркасные конструкции катушек индуктивности и вариометров из высокочастотных проводов, изолированных тканевой изоляцией, стали заменять сварными из провода марки ПВВЭП, изолированного полиэтиленом.

После сварки витков между собой образуется монолитная самонесущая конструкция, способная противостоять механическим нагрузкам и электрическим процессам, рассмотренным ранее применительно к дросселям.

Возможные в непроваренных участках между витками пустоты и раковины приводят к образованию частичных разрядов и ускоренному старению полиэтилена, что особенно характерно для начальных витков, на которые при включении падает большая часть напряжения.

Появление частичных разрядов, которые недопустимы также по условиям образования радиопомех, может иметь место между вершинами соседних витков при наличии между ними зазубления.

В вариометрах такая область повышенной напряженности находится в воздушном зазоре между ротором и статором.

Переходные процессы и перенапряжения в катушках индуктивности происходят в тех редких случаях, когда переключения дискретных участков в процессе настройки происходят под нагрузкой, а в вариометрах — при перемещении ротора.

1.1.5. Эксплуатация импульсных трансформаторов и зарядных дросселей.

В импульсных трансформаторах, помимо переходных режимов, обусловленных короткими замыканиями, перегрузками и перенапряжениями, возникают нестационарные процессы в пределах каждого полупериода. Такие процессы связаны с малыми значениями емкости и индуктивности рассеяния обмоток. К большинству импульсных трансформаторов предъявляются высокие требования по межвитковой и межслоевой емкости, значение которой влияет на форму трансформируемых или формируемых импульсов.

Некоторые типы трансформаторов, например работающих в схемах радиолокационных устройств, имеют большую частоту импульсов.

Из-за значительной диэлектрической проницаемости компаундов и невозможности обеспечить малые значения межвитковой и межслоевой емкости применение эпоксидной изоляции для импульсных трансформаторов ограничено. Большие диэлектрические потери на повышенных частотах также ограничивают область применения такой изоляции, и для них используются материалы с низкими значениями  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$ .

Зарядные дроссели обычно используются в зарядных схемах импульсных формирующих цепей в качестве элементов, отделяющих импульсную часть от источника постоянного тока, или в качестве разделительного элемента активного сопротивления.

Зарядный дроссель работает при высоком потенциале по отношению к земле. Наряду с приложенным высоким переменным напряжением через обмотку катушки проходит постоянный ток. Частота переменного напряжения на обмотке определяется частотой повторения импульсов, а характер переходных процессов будет соответствовать явлениям, имеющим место в импульсном трансформаторе.

1.1.6. Разъединители механической блокировки, контакторные устройства, выключатели, переключатели.

Разъединители механической блокировки (РМБ) применяются для разряда накопителей емкости и защитного заземления элементов радиотехнической аппаратуры (РТА), находящихся в процессе эксплуатации под напряжением.

Иногда, например при работе на длинную линию, значение такого заряда может измеряться в килоджоулях. Изоляция РМБ при таких разрядах испытывает не только воздействие дуги, но и значительные электродинамические усилия.

То же относится и к контакторным устройствам, включение или отключение которых происходит под токовой нагрузкой.



Учитывается также температура перегрева изоляции относительно окружающей среды вследствие потерь в контактной системе.

Коммутация выключателей и переключателей контурных устройств происходит обычно без токовой нагрузки, что уменьшает обгорание контактов и позволяет упрощать их конструкцию. Однако длительное нахождение под высоким напряжением и тепловой нагрузкой из-за переходных сопротивлений в контактных устройствах создает специфические условия эксплуатации изоляции.

Изоляция, в которую заделаны контактные устройства, в момент включения и отключения испытывает механические нагрузки.

В некоторых конструкциях пружинного типа эти нагрузки могут быть непрерывными. Даже если их значение составляет 30...40% временного сопротивления или предела прочности на сдвиг, могут создаваться предпосылки для ускоренного электрического старения изоляции под действием механического нагружения, тем более — при одновременном тепловом старении. В таких случаях требуется особенно тщательная проработка условий образования самостоятельного и частичного разрядов в зоне тройного сопряжения. Как и в других высоковольтных элементах и устройствах, влияние условий эксплуатации на изоляцию коммутационной аппаратуры учитывается комплексно, а не по отдельным, даже наиболее существенным факторам.

#### 1.1.7. Антенно-фидерные тракты.

Электрическая прочность антенно-фидерных трактов (АФТ) является функцией частоты, температуры, давления, меняется при наличии в электрическом поле диэлектрика, зависит от формы проводников, к которым подводится напряжение, и от расстояния между ними. Частота и мощность определяют температуру перегрева изоляции тракта.

Общепринятых норм, которые бы регламентировали тепловые режимы, не существует. Предельной допустимой температурой для фидеров, проводники которых выполнены из меди, считают  $150^{\circ}\text{C}$ , так как при дальнейшем повышении температуры начинается интенсивное окисление меди, что вызывает увеличение продольного затухания фидера. Кроме того, температура наружных проводников в этом случае составит  $75...90^{\circ}\text{C}$  при  $t_{\text{окр}} = 50^{\circ}\text{C}$  и дальнейшее ее повышение может вызвать неудобства при эксплуатации.

Предельная допустимая напряженность электрического поля в изоляционных конструкциях антенно-фидерных трактов и соответствующая пиковая мощность определяются условиями образования самостоятельного разряда и частичных разрядов.

Наличие высокочастотного коронного разряда на элементах антенно-фидерных трактов может привести либо к нагреванию и повреждению оборудования, либо к полному пробое разряд-

ного промежутка. Поэтому частичные разряды недопустимы в антенно-фидерных трактах для максимальной частоты в рабочем диапазоне.

Для уменьшения потерь электромагнитной энергии, передаваемой по фидеру, потери в изоляции должны быть минимальными.

Конструкция антенно-фидерных трактов оставляет мало вариантов для снижения напряженности и исключения частичных разрядов. Повышенная опасность локального напряжения возникает обычно в «нерегулярной» части антенно-фидерных трактов в зоне образования «тройников», «крестовин» и других сложных переходов, где увеличение изоляционного промежутка невозможно по сравнению с «регулярной» частью, имеющей коэффициент неравномерности электрического поля значительно меньшего значения. Снижение коэффициента  $k_n$  в «нерегулярной» части посредством экранирования или введения барьерной изоляции практически маловероятно из-за необходимости сохранения волнового сопротивления по всей длине антенно-фидерного тракта и других волновых параметров.

Переходные процессы в антенно-фидерных трактах крайне ограничены, так как вся коммутация происходит без нагрузки и образования перенапряжений не наблюдается.

## 1.2. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ВНЕШНЮЮ ИЗОЛЯЦИЮ

Все виды стационарных и переходных процессов на входе и выходе трансформаторов, дросселей, катушек индуктивности, генераторных ламп и других активных высоковольтных элементов силовой и радиотехнической аппаратуры воздействуют на их внешнюю и внутреннюю изоляцию пассивных изоляционных конструкций, которыми являются различные типы изоляционных частей активных элементов или опорные, проходные поворотные (в вариометрах) и другие типы изоляторов.

Особенность режимов работы внешней изоляции выключателей, переключателей, РМБ и других типов коммутационной аппаратуры связана с локальными нагревами в местах заделки металлических контактных элементов конструкции и наличием повышенной напряженности в зонах тройного сопряжения (изоляция—воздух—металл), что требует снижения расчетных значений  $E_{\max}$  на этих участках. Одновременно приходится учитывать влияние различных климатических факторов, возможных в процессе эксплуатации изоляционных конструкций и способных ускорить процесс старения полимерной изоляции.

В керамической изоляции, обладающей высокой теплостойкостью, короно- и дугостойкостью, при значительных колебаниях температуры появляются микро- и макротрещины, возможно отслоение глазури. Дальнейшее нарушение поверхности

На границе изоляции и контактных элементов обусловлено также повышенной влажностью, появлением инея и росы.

При появлении дефектных участков поверхности керамики возникает локальное повышение напряженности электрического поля, снижение напряжения поверхностных частичных разрядов, стримеров и других явлений, ухудшающих состояние поверхности. На высоких частотах внешняя изоляция в большей мере, чем на постоянном токе и частоте 50 Гц, зависит от состояния поверхности, чистоты ее обработки, наличия отдельных дефектов или инородных частиц. Уже при сравнительно низких напряжениях возникают частичные разряды, быстро перерастающие в непрерывное свечение, стримеры и поверхностные пробы.

Наиболее опасным является возникновение факельной формы разряда, которая может появляться при попадании в высоковольтное поле большой напряженности на частоте, соответствующей мегагерцам, микропылинок, насекомых и других инородных включений. Плазма такого разряда имеет температуру более 2000° С.

Факельный разряд способен под действием воздушного потока перемещаться по элементам высокочастотной аппаратуры, приводя к обгоранию и оплавлению ее отдельных деталей и элементов, создавая серьезные повреждения.

### 1.3. ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В период транспортировки, хранения и эксплуатации твердая изоляция в высоковольтных конструкциях подвергается климатическим и механическим воздействиям, которые могут способствовать ее ускоренному старению или привести к необратимым повреждениям — пробоям, нарушению сплошности в виде трещин и отслоений, образованию токопроводящих мостиков, эрозии поверхности и т. п.

Необратимым повреждениям в пластмассах может предшествовать общее старение под действием внешних факторов без отчетливо выраженной электрической, механической или тепловой нагрузки.

Такое старение выражается в увеличении угла диэлектрических потерь  $\tan \delta$  и сопротивления изоляции, снижении электрической, механической и адгезионной прочности, увеличении жесткости и изменении размеров и формы изоляции, появлении микротрещин и т. д.

Для керамических материалов общее старение может характеризоваться изменением механических свойств появлением микротрещин, изменением цвета и другими явлениями.

Это старение обусловлено наличием большого числа воздействующих факторов и их взаимодействий.

Для материала с высокими температурами стеклования, такими, как жесткие эпоксидные материалы, керамика, лейкосапфир, в которых внутренние механические напряжения и микродефекты возникают при изготовлении, в ходе эксплуатации, при хранении и транспортировке, характерно дальнейшее изменение электрофизических свойств, связанных с перепадом температур и внешних механических нагрузок.

Климатические воздействия вызывают в полимерных материалах физические и химические изменения. Они зависят от интенсивности и длительности этих воздействий. Основными следует считать влияние положительных и отрицательных температур, влажности воздуха, суточных перепадов температур относительно  $0^{\circ}\text{C}$ .

Длительное их воздействие вызывает термоокислительную деструкцию, набухание и растрескивание, возникает разложение полимера с выделением углекислого газа. Происходит одновременно дезориентация структурных элементов полимера и как следствие — усадка наполнителя. Усадка связующего создает внутренние напряжения в полимере, чему способствуют расхождения в значениях ТКЛР между связующим и наполнителем.

Усадочные явления наблюдаются и при увлажнении. Рентгенографическими исследованиями зафиксированы конкурирующие процессы дезориентации и доориентации наполнителя при старении, приводящие к усадке и удлинению наполнителя. В зависимости от скорости протекания каждого из этих процессов возможно снижение или некоторое увеличение прочности полимерного наполненного материала при хранении или эксплуатации.

Полиолефины и фторлоны также характеризуются необратимыми изменениями своих свойств вследствие старения под влиянием климатических факторов.

Наиболее частыми являются воздействия температуры и механической нагрузки. Особенно активно влияние перепада температур относительно  $0^{\circ}\text{C}$  и механических циклических нагрузок.

Для керамических материалов особенно опасными являются термоциклы, которые могут иметь место в резко континентальном климате, особенно в пустынях и горных местностях.

Все многообразие требований к изделиям в зависимости от условий эксплуатации в различных климатических районах регламентируется ГОСТ 15150—69.

Стандарт предусматривает десять видов исполнений, из которых восемь определяются различными макроклиматическими районами, а из двух оставшихся одно — предусматривает эксплуатацию в любом климатическом районе на суше и другое — для всех макроклиматических районов на суше и на море.

Для каждого из десяти исполнений с учетом места размеще-

ния допускается пять категорий изделий.

Предъявляемые требования к изделиям и методы их испытаний в зависимости от степени жесткости климатических и механических воздействий нормируются ГОСТ 16962—71.

В индустриально развитых странах, продукция которых широко экспортируется, классификация изделий осуществляется также по группам жесткости в зависимости от вида аппаратуры.

В некоторых случаях требования унифицируются для нескольких стран, связанных между собой региональными, экономическими или другими договорами.

В США находятся в обращении два вида технических условий: на трансформаторы и дроссели для военной радиоэлектронной аппаратуры (документы серии MIL-T) и на изделия общетехнического назначения, разработанные Ассоциацией электронной промышленности (серии RS).

Технические условия на трансформаторы и дроссели для военной аппаратуры и отдельно для аппаратуры общетехнического назначения существуют в Англии (EE-5214), в ФРГ и в других странах.

Все документы этого типа регламентируют температуру окружающей среды, относительную влажность воздуха, наличие туманов, химических или биологически агрессивных сред, возможность быстрого перепада температур, пониженное или повышенное давление, наличие солнечной радиации и радиоактивных излучений и т. п.

Каждый из указанных факторов по-разному влияет на изменение изоляционных и герметизирующих свойств твердой изоляции.

Эпоксидные компаунды обычно применяются для стационарной и передвижной аппаратуры, работающей в диапазоне температур окружающего воздуха от  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ , при повышенной относительной влажности до 100%, в условиях росы, морского тумана, при вибрационных, циклических и ударных нагрузках. Компаунды хорошо противостоят различным агрессивным средам и радиоактивным излучениям. Некоторые типы компаундов на основе циклоалифатических смол устойчивы против действия солнечной радиации.

Для высоковольтных высокочастотных электроэлементов применяется высокочастотная керамика, лейкосапфир, фторопласт, полиэтилен и некоторые другие полимерные материалы.

Существенное влияние на изменение свойств изоляции под действием внешних условий оказывают конструктивные особенности изделия: толщина, геометрия и масса главной изоляции, форма или размеры обмоток или других электродов, примененные активные, изоляционные и конструкционные материалы, залитые в изделия или механически связанные с изоляцией. К последним относятся магнитопроводы, клинья для крепления ка-



тушки, прокладки и другая арматура.

Например, при изменении окружающей температуры, вследствие разности температурных коэффициентов линейного расширения различных конструктивных материалов, монолитно связанных с твердой изоляцией, возникают деформации, которые приводят к внутренним механическим напряжениям в изоляции, способным разрушить ее или привести к отслоениям от инородных залитых материалов.

Разрушающее действие, зависящее от геометрии изоляционного слоя, может оказывать повышенная влажность и т. д. Все это принимается во внимание при проектировании высоковольтных изоляционных конструкций.

### 1.3.1. Температура.

Свойства твердой изоляции в процессе эксплуатации в значительной мере изменяются в результате тепловых воздействий. Срок службы ее зависит от значения рабочей температуры и может быть представлен в соответствии с данными технических условий МП-Т-27 кривой на рис. 1.2.

Нагрев изоляции вызывает обратимые и необратимые изменения электрофизических и физико-механических свойств в зависимости от значения температуры и длительности ее воздействия.

Свойства, которые в первый период срока службы носят полностью обратимый характер (модуль Юнга, тангенс угла диэлектрических потерь и др.), с течением времени частично теряют такую способность и постепенно приобретают устойчивые изменения.

Если температура эксплуатации эпоксидных компаундов в первые 2...3 тыс. ч не превышает полуторного значения температуры стеклования, то происходит дальнейшее снижение  $\tan \delta$  и повышение временного сопротивления, т. е. имеет место некоторое улучшение электрических и механических свойств изоляции. Это объясняется продолжающимися после основной стадии полимеризации процессами усиления сшивки длинных молекул полимеров и структурирования. В дальнейшем, под влиянием нагрева, усиливаются окислительные процессы, появляются явления деструкции, удаляются в виде летучих продукты химических реакций или низкомолекулярных компонентов (например, пластификаторов).

Скорость разрушения изоляции под действием нагревания увеличивается при наличии других внешних условий: влаги, агрессивных включений, усиления концентрации кислорода и других факторов, способных привести к ускорению процессов старения. Старение ускоряется при освещении ультрафиолетовыми лучами.

На необратимые изменения в твердой изоляции под действием положительных рабочих температур влияют наличие электрического поля и механическое нагружение.

Изоляционные, конструкционные и герметизирующие свойства полимеров зависят от рецептуры и технологии изготовления. Эти свойства отражаются на способности противостоять статическим и динамическим (ударным, вибрационным) нагрузкам, которые испытывает изделие в процессе эксплуатации в нагретом состоянии. Расчет и проектирование твердой изоляции производится также с учетом отрицательных температур окружающей среды.

Воздействие низких отрицательных температур изделия испытывают, главным образом, в условиях хранения и транспортировки.

Наиболее опасные случаи возникают при быстром подъеме изделий на высоту 9 км и более, когда температура окружающей среды быстро падает от положительного значения до — (50...60)°С.

С понижением температуры повышается хрупкость изоляции и усиливаются внутренние механические напряжения. Несмотря на некоторое увеличение прочности материала на растяжение при отрицательных температурах, возможность разрушения значительно возрастает. Это объясняется, в частности, тем, что при быстром перепаде температур (термударе) релаксационные явления практически отсутствуют вследствие большой скорости изменения физического состояния, а в местах концентрации возникают особенно опасные механические напряжения.

Влияние отрицательных температур на старение связано с увеличением в связующей составляющей компаунда микротрещин под действием внутренних механических напряжений.

Электрические свойства эпоксидной изоляции при отрицательных температурах подвергаются незначительным изменениям.

Аналогичные влияния температур характерны и для других твердых полимерных диэлектриков.

Керамические материалы не столь чувствительны к положительным температурам, имеющим место при климатических явлениях, за исключением явлений, происходящих при переходах температур через 0°С.

### 1.3.2. Повышенная влажность.

Влияние влажности на электроизоляционные свойства твердых диэлектриков зависит от их гигроскопичности и влагопроницаемости, т. е. от способности сорбировать влагу из окружающей среды или способности ее пропускать.

Наряду с ухудшением электроизоляционных свойств вследствие поверхностного шунтирования относительно низкоомным слоем конденсированной влаги проникновение влаги внутрь электроизоляционных материалов резко снижает их электрическое сопротивление, электрическую прочность. Происходит увеличение диэлектрических потерь и снижение напряжения теплового пробоя, снижается механическая прочность. В некоторых



случаях в результате растворения компонентов диэлектрика или изменения его химического состава может произойти механическое разрушение.

В керамических материалах проникновение влаги в микротрещины при последующем понижении температур ниже  $0^{\circ}\text{C}$  приводит к постепенному разрушению и выходу из строя изоляционной конструкции.

Влияние воздушной среды на диэлектрические свойства диэлектриков определяется относительной и абсолютной влажностью, а также загрязнением воздуха.

Относительная влажность определяет скорость перехода влаги из воздуха на поверхность твердого тела.

Абсолютная влажность влияет на увеличение вероятности сорбции молекул воды в результате увеличения их относительного количества в воздухе. Увеличивается также количество конденсируемого пара при снижении температуры ниже точки росы.

В присутствии центров конденсации, которыми могут быть поверхностные неоднородности или поверхностные заряды диэлектриков, перенасыщение воздуха влагой может происходить и при более высокой температуре, чем при обычной точке росы [4].

Загрязнения воздуха бывают водонерастворимые или водорастворимые.

Водонерастворимые вещества в виде сажи, химически активных или абразивных веществ могут снизить поверхностное сопротивление диэлектрика, привести к разрушению ее поверхности и ухудшению гидрофобности.

Из водорастворимых загрязнений воздуха наибольшую опасность представляют соли и кислоты.

Взаимодействие диэлектрика с влажной средой определяется адсорбцией влаги на поверхности, проникновением влаги в диэлектрик и поглощением влаги в объеме диэлектрика.

Адсорбционные свойства поверхности определяются смачиваемостью, которая оценивается краевым углом смачивания.

Адсорбция влаги на поверхности зависит от строения молекул полимерных материалов и их цепей, чистоты обработки, растворимости вещества диэлектрика или его составляющих в воде, наличия и характера загрязнений.

Влаго- и водопоглощение диэлектрика определяется количеством влаги, накопившейся в объеме диэлектрика при его контакте с влажной средой или водой. Степень насыщения водой зависит от плотности структуры, молекулярного состава, наличия и свойства наполнителя, а также от температуры и времени, в течение которого происходит водопоглощение.

На влагостойкость влияют различные эксплуатационные условия: температура, механические нагрузки, электрические поля,

Большое значение имеют технологические факторы, приводящие к появлению шероховатости, пористости, возникновению трещин и нарушающих однородность поверхности диэлектрика. Механическая обработка после отверждения заготовки приводит к нарушению поверхностного слоя ориентированных молекул и дает обычно шероховатую, легко загрязняющуюся поверхность с множеством микротрещин и микропор.

Для эпоксидных компаундов при наличии ненарушенного гидрофобного слоя адсорбция растет с увеличением влажности воздуха.

Объемное поглощение влаги материалом происходит путем диффузии. Наибольшее водопоглощение происходит при температуре 20...40°С в течение первых нескольких суток, до момента возникновения равновесного состояния.

Сравнительно более высоким водопоглощением обладают пластифицированные компаунды. Тип отвердителя оказывает незначительное влияние на изменение влаго- и водостойкости.

Изменения, появляющиеся при повышенной влажности, полностью обратимы при сушке.

Повышенная влажность оказывает влияние на сопротивление изоляции, напряженность электрического поля при поверхностном пробое,  $\operatorname{tg} \delta$  и мало отражается на физико-механических свойствах. Так, например, после выдержки образцов эпоксидного компаунда в виде лопаток в течение 100 сут при температуре 40°С (ГОСТ 11262—80) временное сопротивление снизилось всего на 20%. Во многих случаях состояние поверхности и ее способность к смачиванию может оказать серьезное влияние на результаты эксперимента. Известно, что гладкая, без дефектов и нарушений поверхность эпоксидных компаундов обладает гидрофобными свойствами и препятствует проникновению влаги.

Срок службы эпоксидных компаундов в условиях повышенной влажности определяется физико-химическими процессами на их поверхности. Большое значение имеет начальная стадия этих процессов, в результате которых возникает шероховатая и гигроскопическая поверхность, связанная с электролитической эрозией от частичных разрядов.

С увеличением напряжения поверхностная проводимость сначала возрастает, достигает максимального значения и затем уменьшается. Причем с уменьшением относительной влажности максимум сдвигается в сторону больших напряжений.

Отмечено также увеличение скорости проникновения влаги в образцах полиэтилена, подвергшихся воздействию электрического поля.

Скорость и степень загрязнения поверхности для полимерных материалов при прочих равных условиях зависит, кроме степени ее шероховатости, от значения и знака поверхностного заряда по отношению к заряду частиц пыли. По причине легкой элек-

тризации даже такой влагостойкий диэлектрик, как фторопласт, в загрязненной пылью атмосфере покрывается коркой грязи, удаляемой только механическим путем. При повышенной влажности такая поверхность теряет высокие электроизоляционные свойства.

Еще сильнее ухудшаются электроизоляционные свойства, если водорастворимые загрязнения попадают на механически обработанные или поврежденные участки диэлектрика.

Водорастворимые загрязнения проникают также в глубь материала и при циклическом изменении температуры могут накапливаться внутри.

Влияние повышенной влажности, туманов и росы на изменение свойств изоляции зависит также и от следующих факторов:

от формы поверхностного слоя изоляции зависит ее способность к равномерному высыханию, тем самым исключается возможность создания локальных повышений напряженности электрического поля вследствие наличия отдельных увлажненных участков;

от наличия участков адгезии с другими материалами и положением этих адгезионных слоев относительно горизонтальной плоскости, что может способствовать скоплению влаги вдоль слоев, обладающих пониженной, по сравнению с монолитным компаундом, механической прочностью;

от воздействия абразивных, загрязняющих и агрессивных включений в окружающей атмосфере, от воздействия солнечной радиации, частичных разрядов и т. п. зависит состояние поверхности и влияние повышенной влажности на свойства изоляции.

Таким образом, при проектировании учитывают всю совокупность факторов, влияющих на изоляцию под действием повышенной влажности.

Эпоксидный компаунд является тропикостойким герметизирующим материалом, слабо реагирующим на влияние различных видов плесени.

Некоторые пластификаторы, особенно растительного происхождения, понижают стойкость к воздействию плесени.

### 1.3.3. Радиационная стойкость.

Во время процесса облучения эпоксидных компаундов происходит одновременно поперечное сшивание и разрушение связей длинных молекул. Степень повреждения определяется поглощенной энергией и будет зависеть от типа компаунда, вида и интенсивности излучения.

Под воздействием радиации появляется обесцвечивание поверхности, растрескивание, образуются раковины, изменяются механические и электрические свойства. Более нагревостойкие компаунды менее подвержены действию радиации. Теплостойкие жесткие компаунды с неорганическими наполнителями про-

являют слабые изменения при воздействии на них дозы до  $10^7$  Гц [5].

Свойства полиэтиленов к поперечному сшиванию при радиационном облучении использованы для улучшения некоторых характеристик.

#### 1.3.4. Механические факторы.

В процессе эксплуатации, транспортировки и хранения твердая изоляция находится под действием статических и динамических нагрузок.

Способность изоляции противостоять этим нагрузкам, помимо ее нормативных физико-механических свойств, зависит от способа изготовления и от тех остаточных внутренних так называемых термоупругих напряжений, которые возникают при охлаждении монолитной изоляционной конструкции. Стойкость изоляции к механическим воздействиям в значительной мере зависит от конструкции изделия, от формы деталей крепления, от отсутствия концентраторов напряжений, наличия вокруг закрепленных в полимерном материале деталей демпфирующих прослоек и т. д.

Обеспечение стойкости твердой изоляции к воздействию внешних условий осуществляется в результате рассмотрения всех вопросов, влияющих на электрофизические и физико-механические свойства применительно к индивидуальным конструктивным решениям.

## ГЛАВА ВТОРАЯ

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Наиболее широкое распространение в силовой и радиотехнической аппаратуре внутренних установок постоянного и переменного тока частотой до 100 кГц, а в некоторых случаях и до 400 кГц нашли различные эпоксидные компаунды. Этому способствовали их высокие изоляционные, механические, конструкционные, герметизирующие и технологические свойства.

Сравнительная простота технологии изготовления, возможность механизации, автоматизации, а также возможность осуществления мелкосерийного производства обеспечили эпоксидным компаундам мировое признание при изготовлении изоляционных конструкций различного назначения.

Для изоляции высоковольтной аппаратуры средне- и длинноволнового диапазона по-прежнему успешно используются различные марки высокочастотного фарфора: стеатит, ультрафарфор. Для высоких и сверхвысоких частот иногда применяются монокристаллические композиции из искусственного сапфира (лейкосапфира) различной геометрии и габаритов. Материал имеет высокую рабочую температуру, характеризуется ко-

ропо- и дугостойкостью, высокими электрическими и механическими характеристиками на сжатие и сдвиг, но чувствителен к ударным нагрузкам. Сравнительно высокая стоимость и технологическая сложность обработки при мелкосерийном производстве, большие допуски на размеры и необходимость точного сопряжения деталей ограничивают их применение в радиотехнической аппаратуре.

Для высокочастотных диапазонов широко используются полимерные материалы типа полиэтиленов, фторопластов, полипропиленов и их модификации. Для высоковольтных конструкций их применение сдерживается слабой короно- и дугостойкостью, а также низкими механическими характеристиками.

Большим преимуществом этих полимеров является высокая технологичность, возможность переработки стандартными методами. Материалы удобно использовать как в мелко-, так и в крупносерийном производстве.

Особенностью высокочастотных материалов является способность при переработке создавать крупногабаритные монолитные или с толщиной стенок до 20...30 мм конструкции.

Такие полимерные материалы успешно применяются в высокочастотных изоляционных конструкциях, а также в конструкциях, рассчитанных на промышленную частоту.

## 2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ, ПОЛЯРИЗАЦИЯ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

**Эпоксидные компаунды.** Компаунды на основе эпоксидно-диановых смол характеризуются большим объемным сопротивлением и сравнительно малыми значениями диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь.

Свойства отвержденных компаундов изменяются в зависимости от температуры: в вязкоупругом (стеклообразном) состоянии электрические характеристики значительно выше, чем в высокоэластическом.

Скорость релаксационных процессов в стеклообразном состоянии у них мала.

Оптимальные электроизоляционные свойства компаундов достигаются при стехиометрическом соотношении отвердителя и смолы (один активный атом водорода на эпоксидную группу).

Эпоксидные компаунды характеризуются стабильностью в условиях повышенной влажности и теплостойкостью при температурах 100...125° С. Они хорошо переносят колебания температуры от -60 до +125° С.

Зависимость удельного объемного сопротивления от температуры компаундов с аминными и кислотными отвердителями имеет форму прямых линий, которые в определенном интервале температур меняют угол наклона. Температура, при которой происходит изменение наклона, соответствует температуре

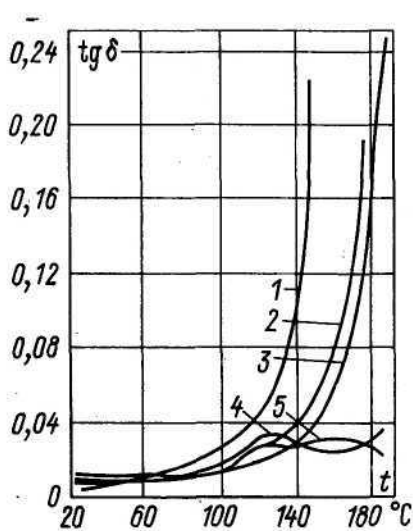


Рис. 2.1. Зависимость угла диэлектрических потерь компаунда марки ЭЗК-1 от температуры

1 — 50 Гц; 2 — 0,4 кГц; 3 — 1,0 кГц; 4 — 10,0 кГц; 5 — 1,0 МГц

стеклования компаунда, т. е. моменту перехода из высокоэластичного в стеклообразное (твердое) состояние. При значениях выше, чем температура стеклования, подвижность и количество носителей тока увеличивается, что приводит к росту проводимости [6]. При максимальных рабочих температурах 125 °С удельное объемное сопротивление не бывает ниже  $10^8$  Ом·м. Наибольшее значение  $\rho$  при нормальной окружающей температуре составляет  $10^{14} \dots 10^{15}$  Ом·м.

Под действием электрических разрядов электрическая проводимость эпоксидных компаундов увеличивается, причем поверхностная проводимость изменяется значительно сильнее, чем объемная. Снижение удельного поверхностного со-

противления под действием разрядов зависит от их интенсивности и мало зависит от состава компаунда.

Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  от температуры для разных частот для дианового компаунда марки ЭЗК-1 иллюстрируется рис. 2.1. Ход кривых свидетельствует о незначительных изменениях диэлектрических потерь в зависимости от частоты в пределах до 80...100 °С. С ростом частоты максимальные значения сдвигаются в сторону температур 120...160 °С. Для частоты 50 Гц значительный рост  $\text{tg } \delta$  отмечается при температурах выше 120 °С.

Влияние частоты на изменение диэлектрической проницаемости от температуры до 80...100 °С проявляется в пределах значений 4,3...5.

Замена отвердителя незначительно влияет на диэлектрические потери эпоксидных компаундов при нормальной окружающей температуре.

Длительное воздействие повышенной температуры приводит к небольшому уменьшению  $\text{tg } \delta$ , которое связано с продолжающимся структурированием компаунда. После воздействия температуры 100...120 °С в течение более 2...3 тыс ч начинается медленное постепенное увеличение диэлектрических потерь, что свидетельствует о начинающихся процессах разложения полимера, его деструкции.



Исследования полимеров в процессе теплового старения при помощи сканирующих микроскопов показали, что после 2000...3000 ч появляются изменения надмолекулярной структуры. Наиболее интенсивные изменения происходят при наличии неоднородностей в материале.

Электроизоляционные свойства компаундов в широком диапазоне могут быть изменены варьированием различных типов наполнителей. В отечественной и зарубежной практике нашли применение наполнители следующих основных групп: силикаты, карбонаты, оксиды и гидроксиды металлов, сульфаты.

Фундаментальные исследования влияния наполнителей на электроизоляционные свойства эпоксидных компаундов проведены Е. К. Доберером и Г. Видалем. Оба автора и последующие исследователи показали значительные преимущества пылевидного кварцевого песка (ПКП) по сравнению с другими материалами.

На рис. 2.2 дана зависимость удельного объемного сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для различных наполнителей. Из кривых следует, что наибольшая разница значений  $\rho = f(t)$  у компаундов с различными наполнителями возникает до 100°С, т. е. до температуры стеклования.

В высокоэластичном состоянии удельные значения объемных сопротивлений компаундов с различными наполнителями существенного различия не имеют.

Обращает внимание то, что для всех трех групп кривых лучшие значения зависимости от температуры имеет ненаполненный компаунд. Это, очевидно, связано с влиянием находящихся в наполнителях примесей, которые ухудшают электроизоляционные свойства компаундов, особенно при возможности водопоглощения.

Из рис. 2.3 следует, что водопоглощение, которое оценивалось по значению привеса  $m$  образцов после нахождения в воде,

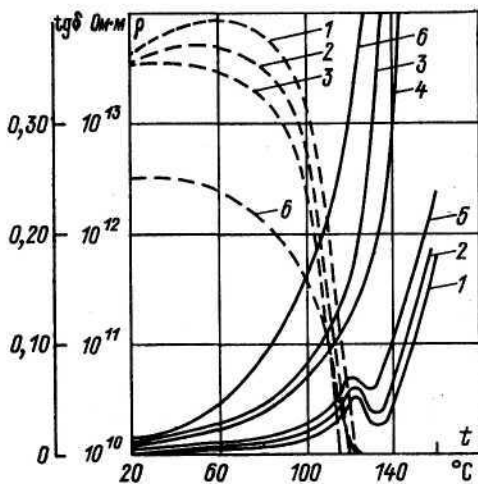


Рис. 2.2. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь (сплошные кривые) и удельного объемного сопротивления (штриховые кривые) от температуры  
1 — без наполнителя; 2 — пылевидный кварцевый песок (ПКП) прокаленный; 3 — ПКП непрокаленный; 4 — маршалит непрокаленный; 5 — маршалит прокаленный; 6 — фарфоровая мука



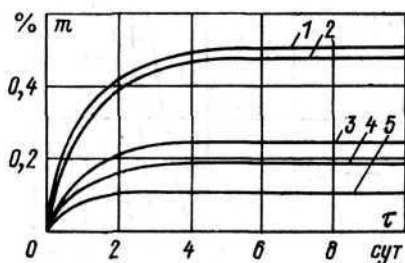


Рис. 2.3. Зависимость водопоглощения компаунда с различными наполнителями от длительности пребывания в воде

1 — без наполнителя; 2 — каолин; 3 — глинозем; 4 — фарфоровая мука; 5 — ПКП непрокаленный

дисперсности и конфигурации частиц наполнителя. Она влияет на теплопроводность и теплостойкость компаунда, снижает температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), повышает стойкость к скользящему разряду, увеличивает срок жизни компаунда.

Окончательные выводы при выборе типа наполнителя делают с учетом влияния его на электрическую прочность, стойкость к частичным и коронным разрядам и в зависимости от его воздействия на физико-механические свойства.

**Полимерные материалы.** Диэлектрические свойства полимерных материалов (ПЭ, Ф-4, ПП) существенно зависят от химического состава и строения, меняются особенно резко выше температуры стеклования и текучести, когда время релаксации становится малым и соизмеримым с длительностью измерения.

Под влиянием изменения условий переработки диэлектрические свойства ПЭ могут изменяться. Увеличение давления прессования с 0,05 до 0,4 МПа приводит к снижению  $\operatorname{tg} \delta$  при одном и том же напряжении. Уменьшение  $\operatorname{tg} \delta$  более резко проявляется при больших значениях приложенного напряжения.

Широкое применение этот материал получил не только благодаря низкой стоимости и удобству переработки, но главным образом из-за низких диэлектрических потерь на высоких частотах —  $\operatorname{tg} \delta = (3 \dots 4) \cdot 10^{-4}$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon = 2,3$ . Эти характеристики для марок ПЭНД и ПЭВД практически не подвергаются изменению под влиянием температуры в ее рабочем интервале. При повышении частоты до 500 МГц значения  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon$  не изменяются.

Удельное объемное сопротивление  $\rho = 10^{15} \dots 10^{16}$  Ом·м весьма чувствительно к повышению температуры и при  $t = 80^\circ \text{C}$  может снизиться на 3...4 порядка.

Исследования показали, что длительность приложения напряжения, не приводящая к образованию частичных разрядов,

является наименьшим при использовании ПКП. Водопоглощение сказывается в первую очередь на электроизоляционных свойствах компаундов.

Применение наполнителей с высокой пористостью (каолин), образование в компаунде агломератов (неперемешанной лишь с поверхности, способствуют проникновению влаги и приводят к повышению водопоглощения.

Структура эпоксидного компаунда существенно зависит от

не влияет на электрическую прочность изоляции. Однако чтобы избежать значительных ошибок при расчетах сопротивления изоляции, необходимо принимать во внимание температуру и значение прикладываемого напряжения. Для ПЭВД с повышением напряженности электрического поля происходит большее снижение сопротивления изоляции, чем для ПЭНД, имеющего большую степень кристалличности.

Миполонами названы сшитые модифицированные материалы на основе ПЭ высокой и низкой плотности. Композиции в зависимости от назначения могут также содержать различные модифицирующие добавки в виде наполнителей, термо- и фотостабилизаторов и др.

Детали могут изготавливаться обычными методами, используемыми при переработке материала ПЭ и затем подвергаться облучению.

Условное обозначение марок миполона осуществляется по базовому полимеру: «1» — ПЭВД, «2» — ПЭНД, «3» и «5» — дозы облучения.

Миполон может представлять собой блочный модифицированный материал ПЭ, изготовленный методом электровакуумного спекания, непрерывной литьевой экструзией или прессованием, после чего подвергнутый структурированию облучением. Методами непрерывной экструзии и прессования перерабатываются практически любые марки ПЭ, а также наполненные композиции на их основе.

Миполон предназначен для работы на высоких частотах в интервале температур от  $-60$  до  $+90^{\circ}\text{C}$  при наличии механических нагрузок, до  $+140^{\circ}\text{C}$  — без нагрузок и кратковременно — до  $+300^{\circ}\text{C}$ , а также в условиях воздействия климатических и специальных факторов в агрессивных средах.

Миполон марок 1...5, полученный методом горячего прессования, обладает несколько большей трекинговой стойкостью, чем остальные его разновидности.

Как видно из приведенных в табл. 2.1 данных, лучшими диэлектрическими характеристиками обладают миполоны, изготовленные на основе ПЭВД, а лучшими другими характеристиками — миполоны на основе ПЭНД.

В каждом отдельном случае марка полиэтилена и способ изготовления изоляционной конструкции выбираются на основе конкретных условий изготовления и эксплуатации.

Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) благодаря своим высоким диэлектрическим свойствам и теплостойкости нашел наиболее широкое применение для изготовления изоляционных конструкций, работающих во всем диапазоне высоких частот радиотехнической аппаратуры.

Изделия из материала Ф-4 могут быть изготовлены методом прессования (давление выше 25 МПа, а температура — выше  $300^{\circ}\text{C}$ ) или из блоков посредством холодной обработки на стан-

Таблица 2.1

Характеристика	Значение характеристики миполона марки			
	1-3	1-5	2-3	2-5
Плотность при 20° С, кг/м <sup>3</sup>	928	932	959	952
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 <sup>6</sup> Гц	2	4	5	6... 8
Диэлектрическая проницаемость при 10 <sup>6</sup> Гц	2,2	2,2	2,3	2,3
Удельное объемное электрическое сопротивление:				
объемное, Ом·м	10 <sup>16</sup>	5·10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>
поверхностное, Ом	5·10 <sup>16</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	(1... 5)·10 <sup>15</sup>
Водопоглощение за 30 сут при 20° С, %	0,02	0,03	0,01	0,02
Температура размягчения по Вика, °С	120... 125	125	148	149
Температура хрупкости, °С, при изгибе в течение 10 мин для предела текучести расплава:				
< 4 г	-100	-100	-115	-115
4... 8 г	60	60	80	80
Электрическая прочность, МВ/м	45	45	40	40

ках. Последний способ, несмотря на невысокое качество обработки поверхности вследствие волокнистой формы частиц, получил наиболее широкое распространение при изготовлении мелкосерийной радиотехнической аппаратуры. Кроме того, при длительном наличии поверхностного заряда для материала Ф-4 характерна способность оседания частиц из воздуха. Это приводит к образованию на изоляционных конструкциях трудноудаляемых покрытий, снижающих поверхностное сопротивление.

Максимальная рабочая температура материала Ф-4 — 250° С, а температура разложения — выше 415° С. Материал практически не обладает водопоглощением.

Особую ценность материала Ф-4 для аппаратуры высоких и сверхвысоких частот представляют очень малые значения  $\operatorname{tg} \delta = [(2,0 \dots 2,5) \cdot 10^{-6}]$  и  $\epsilon = (1,9 \dots 2,2)$  при 10<sup>6</sup> Гц и независимость от частоты, так же как и от температуры. Удельное объемное (в ом-метрах) и поверхностное (в омах) сопротивление его превосходит значение 10<sup>17</sup>.

Однако так же как и полиэтилен, фторопласт-4 обладает невысокой короностойкостью, что заставляет применять его при напряжениях, гарантирующих отсутствие частичных разрядов и поверхностных пробоев.

**Стеатитовая керамика.** Керамика, особенно марки Б-17, по-прежнему широко используется для изготовления высокочастотных высоковольтных конструкций. Этому способствуют не только низкая стоимость сырья, но и высокие электрические и механические свойства, малые диэлектрические потери и срав-

нительно небольшая диэлектрическая проницаемость, высокая температурная стойкость, отсутствие в ряде случаев открытой пористости, плотное строение материала и способность обеспечения высокого класса чистоты поверхности.

Исключительное значение для высокочастотных конструкций приобретает коронно- и дугостойкость стеатитовой керамики, особенно с глазурованной поверхностью.

Отклонения в значениях  $\operatorname{tg} \delta$  могут быть связаны с наличием воздушных включений в керамике.

Под действием сильных электрических полей в воздушных включениях происходят разряды. Число разрядов в отдельной поре в единицу времени зависит от размеров и формы полости, от частоты и напряженности электрического поля, от удельной проводимости и диэлектрической проницаемости керамики.

Во время пробоя газа в поре размерами менее 0,1 мм напряженность электрического поля в полости убывает до нуля. При разряде в крупной поре напряженность уменьшается лишь в небольшой области.

Разряды в воздушных включениях приводят к дополнительным затратам энергии и к увеличению  $\operatorname{tg} \delta$ . В сильных высокочастотных полях ионизация газа в порах может вызвать разогревание и раскалывание твердых диэлектриков.

Величина  $\operatorname{tg} \delta$  и зависимости  $\operatorname{tg} \delta = f(E)$  связаны с количеством и размерами пор. При определении зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  от напряженности поля необходимо принимать во внимание, что в различных по размерам порах пробой в газе происходит при разных напряженностях. Распределение пор и их размеры влияют на зависимость  $\operatorname{tg} \delta = f(E)$ . Этим, в частности, обусловлены некоторые расхождения в значениях  $\operatorname{tg} \delta$  у одинаковых материалов, изготовленных на разных заводах.

Стеатитовая керамика марки Б-17 имеет температуру спекания 1310...1370°С и плотность около 3 г/см<sup>3</sup>. При диэлектрической проницаемости 6,0...6,5 тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 МГц и температуре 20°С составляет 0,0006. На практике значение  $\operatorname{tg} \delta = 0,0008 \dots 0,002$ . Керамика при  $t = 100^\circ\text{C}$  имеет удельное объемное сопротивление  $\rho = 10^{17}$  Ом·м. ТКЛР в интервале температур 20...100°С составляет (7,0...7,5) · 10<sup>6</sup> К<sup>-1</sup> и имеет предел прочности при статическом изгибе 137...147 МПа. Усадочные коэффициенты при спекании: 1,11...1,12 — на водной связке по контуру, 2...5 — по высоте, 1,12...1,13 — на поливиниловом спирте, 1,14...1,16 — на парафиновой связке по контуру, 1,15...1,16 — по высоте.

Посетителями электрического поля в керамике могут быть электроны или ионы. Может наблюдаться и смешанная проводимость.

Подвижность электронов обычно на много порядков больше подвижности ионов. Для стеатитовой керамики марки Б-17 элек-

трическая проводимость имеет ионный характер и перенос происходит за счет Na, Mg и Ca.

При высоких напряженностях постоянного электрического поля и повышенных температурах в высокочастотной керамике возникает явление ползучести — медленное возрастание электрической проводимости во времени, которая может привести к пробою керамики.

Указанные явления имеют место в радиотехнической аппаратуре, когда помимо высокочастотной присутствует постоянная составляющая.

Резкое снижение поверхностного сопротивления изоляции керамики наблюдается при относительной влажности выше 70...75% на загрязненной поверхности. При высокой влажности воздуха примеси в виде солей диссоциируют и создают проводящую пленку на поверхности. Значение поверхностного сопротивления повышают покрытием глазурью. Эффект достигается благодаря гидрофобности поверхности, препятствующей осаждению пыли, и смачиванию керамики.

Зависимость  $\operatorname{tg} \delta = f(E)$  в диапазоне температур 26...180° С почти прямолинейна.

При наличии постоянной и переменной составляющих напряженности электрического поля значение  $\operatorname{tg} \delta$  изменяется незначительно.

Зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  от напряженности при значениях  $f = 7...20$  МГц, нормальной температуре и  $E = 0,1...0,4$  МВ/м изменяется в пределах  $(3...4) \cdot 10^{-4}$  с небольшим максимальным значением при  $E = 0,15...0,2$  МВ/м [7].

Появление максимальных значений при  $\operatorname{tg} \delta = f(E)$  можно объяснить ионизационными процессами в газовых включениях керамики. При увеличении частоты максимумы смещаются в сторону меньшей напряженности. То же происходит при возрастании температуры окружающей среды. Температурное смещение амплитуды, очевидно, связано с некоторым снижением электрической прочности воздуха в порах при увеличении температуры.

## 2.2. КРАТКОВРЕМЕННАЯ И ДЛИТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ

### 2.2.1. Эпоксидные компаунды.

Электрическая прочность компаунда в соответствии с условиями эксплуатации определяется в зависимости от частоты, формы кривой приложенного напряжения и его полярности, формы электрического поля, температуры окружающей среды, толщины диэлектрика и его объема.

Помимо рецептуры на электрическую прочность влияет наличие в отвержденном компаунде микро- и макроскопических неоднородностей в виде скоплений частиц наполнителя (агломе-

ратов), газовых пор, трещин, отслоений и т. п. Вероятность увеличения количества и размеров неоднородностей возрастает с увеличением толщины и объема компаунда (масштабный фактор). Неоднородности являются основной причиной разброса значений электрической прочности и ее зависимости от толщины диэлектрика. Наличие неоднородностей приводит к необходимости статистического подхода при экспериментальном определении электрической прочности.

В работе [8] показано влияние объема компаунда на электрическую прочность. В другой работе экспериментальным путем найдено, что до объема  $(2..3) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  прочность с увеличением объема уменьшается быстро. При дальнейшем увеличении объема эта зависимость снижается. Это заставляет предполагать, что в небольших образцах, на которых производился эксперимент, помимо масштабного фактора, на электрическую прочность сказывают влияние механические (термоупругие) напряжения, вызванные залитыми в компаунд металлическими электродами.

Наличие металлических электродов может привести к образованию отслоений компаунда или к возникновению микро- и макротрещин в изоляции, которые затем будут способствовать появлению и развитию канала пробоя.

В рассмотренных случаях сказывается влияние термоупругих напряжений, связанных с возникновением деформаций в компаунде из-за разности ТКЛР материала электрода и литой изоляции. Кривые на рис. 2.4 иллюстрируют зависимость электрической прочности от марки материала электрода. Применение залитых в образец электродов из латуни по сравнению с электродами, выполненными металлизацией на образце, значительно увеличивает зависимость электрической прочности от толщины диэлектрика.

Средние значения электрической прочности компаунда марки ЭЗК-31 в зависимости от его толщины и температуры приведены в табл. 2.2. Испытания производились в резко неоднородном поле между электродами игла — плоскость. Средние арифметические значения пробивных напряжений  $U$  определялись с учетом доверительных интервалов для надежности 0,99 и среднего квадратического отклонения  $\sigma_s$  от среднего значения  $E_{ср}$  с погрешностью  $\xi_n$ .

Из таблицы следует, что отклонения значения  $E_{ср-пр}$  для каждой толщины при температурах 20 и 125° С лежат в пре-

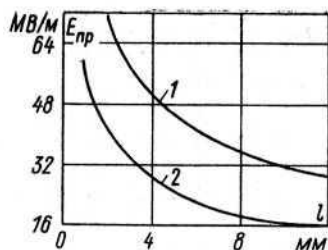


Рис. 2.4. Зависимость кратковременной электрической прочности от толщины компаунда на основе смолы Э-2000 с разными марками материала электродов ( $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $t = 20^\circ \text{ С}$ )

1 — металлизация поверхности;  
2 — залитый латунный электрод



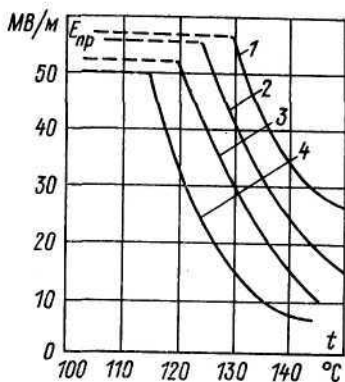


Рис. 2.5. Зависимость кратковременной электрической прочности компаунда от температуры при различном содержании ПКП  
1 — 200 %; 2 — 100 %; 3 — 50 %; 4 — без наполнителя

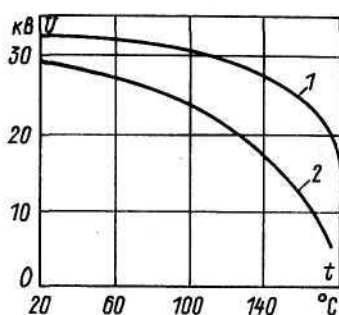


Рис. 2.6. Зависимость напряжения пробоя от температуры между электродами игла — плоскость на расстоянии 0,5 мм для компаунда марки ЭПК без пластификатора (кривая 1) и ЭПК-4 с пластификатором (кривая 2)

Таблица 2.2

Характеристика	Значение характеристики при толщине компаунда, $l \times 10^{-3}$ м, равной					
	2		3		5	
	20 °С	125 °С	20 °С	125 °С	20 °С	125 °С
$U$ , кВ	35,1	33,5	40,0	38,8	55,3	47,5
$E_{ср. пр.}$ , МВ/м	17,5	16,7	13,3	12,8	11,1	9,5
$\sigma_s$ , МВ/м	1,6	2,6	1,4	1,2	0,9	1,1
$E_{ср} \pm \xi_{п}$ , МВ/м	16,1...18,9	14,5...19,9	12,2...14,4	11,4...14,0	10,3...11,9	8,6...10,4

делах погрешности измерения, что свидетельствует об электрическом характере пробоя.

Для электрического поля, близкого к равномерному (электроды плоскость — плоскость), сохраняется такой же характер зависимости кратковременной электрической прочности от температуры. Заметное снижение электрической прочности начинается около 125°С (рис. 2.5). Из кривых также следует, что увеличение теплопроводности посредством роста процентного содержания наполнителя приводит к смещению области теплового пробоя в сторону более высокой температуры и к повышению электрической прочности.

Введение в компаунд пластифицирующих добавок способствует снижению электрической прочности при увеличении температуры (рис. 2.6).

В работе [9] показана зависимость электрической прочности эпоксидной изоляции от радиуса кривизны электродов для по-



лей с коэффициентами неравномерности  $k_n < 3,5 \dots 4$ . Коэффициент  $k_n$  определяется как отношение максимальной напряженности поля  $E_{\max}$  к ее среднему значению,  $k_n = E_{\max}/E_{\text{ср}}$ .

В резко неравномерном электрическом поле при коэффициенте неравномерности, большем четырех, электрическая прочность не зависит от формы электродов.

**Электрическая прочность при длительном воздействии напряжения.** При длительном воздействии напряжения механизм пробоя компаунда зависит от накопления механических и электрических микро- и макроразрушений изоляции и от их развития под действием частичных разрядов.

Ионизационные процессы (частичный разряд) могут возникать в порах, отслоениях, трещинах и т. п. при весьма низких значениях напряжений.

Для поддержания ионизационных процессов требуется напряженность электрического поля, значительно меньшая, чем для возникновения этих процессов.

Большинство авторов считают, что для надежной эксплуатации изделий в течение не менее 10 тыс. ч интенсивность частичных разрядов должна быть не хуже  $10^{-10} \dots 10^{-11}$  Кл [4], а появление частичных разрядов при такой чувствительности должно происходить при напряжении, превышающем на 20% рабочее ( $U_0 \geq 1,2U_p$ ).

Процесс разрушения материала начинается в локальной области максимальной напряженности электрического поля, т. е. около электродов с малыми радиусами кривизны или около включений, содержащихся в компаунде и искажающих электрическое поле. Такими неоднородностями могут, например, явиться поры, скопления ПКП и т. п.

При небольших градиентах напряженности электрического поля на скорость старения влияет размер радиусов кривизны электродов. При больших градиентах поле у электрода искажается объемным зарядом. В этом случае коэффициент неоднородности электрического поля; зависящий от радиусов кривизны электрода, существенно не отражается на скорости прорастания канала пробоя.

Срок службы жестких компаундов при увеличении температуры несколько возрастает [10]. Это объясняется положительным влиянием снижения внутренних механических напряжений в вязкоэластичном состоянии компаунда на процессы электрического разрушения.

Подтверждением влияния термоупругих напряжений на процессы электрического пробоя могут служить результаты исследований зависимости электрической прочности образцов из компаунда марки ЭПК-1 (ЭДб + МА) от механической нагрузки. Из кривых, приведенных на рис. 2.7, видно, что под действием больших растягивающих усилий  $\sigma = 0,75\sigma_b$  образец, находящийся в равномерном электрическом поле, имеет электрическую

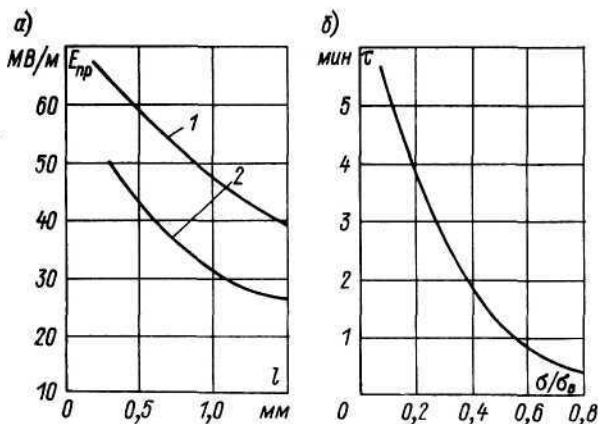


Рис. 2.7. Зависимость электрической прочности компаунда марки ЭПК-1 для электродов игла—плоскость от толщины (а) без механической нагрузки (кривая 1) и с нагрузкой  $\sigma=0,75\sigma_b$  (кривая 2) и срока службы компаунда от механической нагрузки (б)

прочность, на 20...25% меньшую, чем такие же образцы, подвергавшиеся только электрической нагрузке.

На рис. 2.7, б показано, как снижается срок службы образцов в зависимости от увеличения механической нагрузки.

Исследование компаунда ЭЗК-31 показали влияние повышенной рабочей температуры на ход кривых жизни при сроке службы до 1000 ч (рис. 2.8). При дальнейшем увеличении продолжительности эксплуатации влияние температурного фактора на электрическую прочность уменьшается и при напряжениях ниже 3,3 МВ/м становится несущественным.

Сравнение кривых жизни жесткого компаунда марки ЭЗК-1 и модифицированного марки ЭЗК-31 при рабочих температурах 120...125°С (рис. 2.9) свидетельствует о преимуществах первого при времени эксплуатации, меньшем, чем 10 тыс. ч. Толщина компаунда на ход кривых жизни заметного влияния не оказывает.

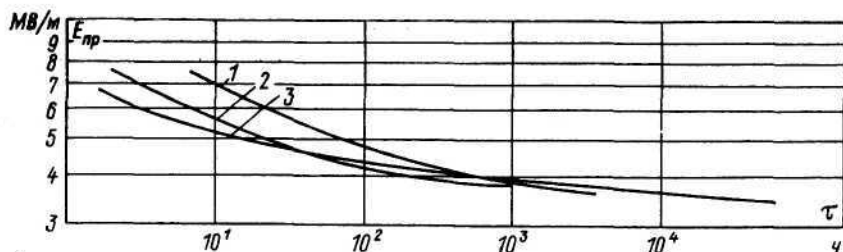


Рис. 2.8. Зависимость электрической прочности компаунда марки ЭЗК-31 от продолжительности приложенного напряжения между электродами игла—плоскость при температуре 125°С и расстоянии между электродами 2 мм (кривая 1) и 3 мм (кривая 3), а 3 мм и  $t=20^\circ\text{C}$  — кривая 2

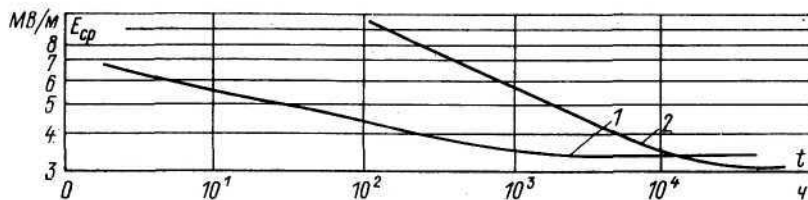


Рис. 2.9. Зависимость электрической прочности от продолжительности приложенного напряжения при  $t=120^{\circ}\text{C}$   
 1 — ЭЗК-1; 2 — ЭЗК-31

Для приближенных расчетов изоляции при температуре  $125^{\circ}\text{C}$  в резко неоднородном электрическом поле электрическую прочность независимо от толщины принимают для компаундов марки ЭЗК-1  $E_{\text{ср}}=2,5$  МВ/м, а для ЭЗК-31 —  $E_{\text{ср}}=2,2\dots 2,4$  МВ/м.

В равномерном электрическом поле при температуре до  $125^{\circ}\text{C}$  длительная электрическая прочность для компаунда марки ЭЗК-31 равна  $6\dots 7$  МВ/м.

Влияние на срок службы перенапряжений, возникающих в изделиях, может быть учтено кривой на рис. 2.10, а. Кривая иллюстрирует зависимость амплитуды перенапряжений  $U_{\Sigma}$  от числа импульсов  $n$ , приложенных до момента пробоя к образцам из компаунда марки ЭЗК-31 толщиной 3 мм с электродами игла — плоскость. Ход кривой свидетельствует о влиянии количества импульсов на электрическую прочность. На рис. 2.10, б показана зависимость срока службы от кратности перенапряжений  $k_n = U_{\Sigma} / U_{\infty}$ . Значение перенапряжений принималось

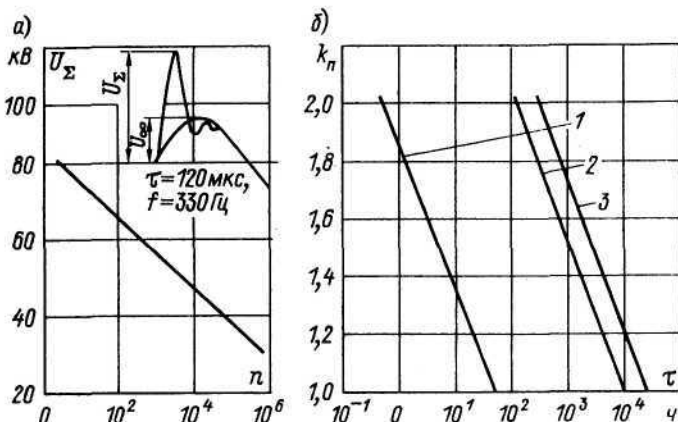


Рис. 2.10. Зависимость суммарной амплитуды воздействующего напряжения для компаунда марки ЭЗК-31 между электродами игла — плоскость ( $l=3$  мм) от количества поданных импульсов (а) и коэффициента перенапряжений от срока службы (б)

1 —  $E=6,7$  МВ/м; 2 —  $E=2$  МВ/м; 3 —  $E=1,2$  МВ/м

равным:  $U_2 = 2U_\infty = 56,5$  кВ;  $U_2 = 42,4U_\infty$  кВ и  $U_2 = 1,2U_\infty = 34,0$  кВ. Из рисунка следует, что при систематических перенапряжениях с кратностью 1,2 для срока службы 10 тыс. ч электрическая прочность составляет  $E_\infty = 1,2$  МВ/м.

Для равномерного электрического поля (электроды плоскость — плоскость) электрическая прочность для тех же условий эксплуатации принимается равной 3,6 МВ/м.

**Влияние вида напряжения.** Влияние на электрическую прочность вида напряжения связано с такими факторами, как амплитуда, скорость нарастания и спада напряжения, длительность его воздействия.

В наименьшей степени эти факторы проявляются при постоянном напряжении, в наибольшей — при импульсном.

В работе [11] показано, что кратковременная электрическая прочность на постоянном напряжении зависит от формы электрического поля ( $k_n$ ), полярности, температуры и в меньшей степени — от толщины образца.

При нагревании образца до температуры перехода компаунда в высокоэластическое состояние ( $70 \dots 100^\circ \text{C}$ ) происходит некоторое увеличение электрической прочности, а затем значительное ее снижение.

Исследования влияния степени неравномерности электрического поля на сроки службы  $\tau$  проводились на образцах оксидных компаундов в системе электродов игла — плоскость. Расстояние между электродами  $l$  устанавливали равным 3 мм. Изменение степени неоднородности производилось изменением радиуса закругления кончика иглы от 2 до 1000 мкм.

Для исследования сроков службы в поле, близком к равномерному, испытывались образцы с электродами плоскость — плоскость ( $l = 1,5$  мм).

Для получения зависимости  $\tau = f(k_n)$  при каждом из значений  $k_n$  испытывалось по 10...160 образцов. Полученные значения, как показано в работе [10], подчиняются экспоненциальному распределению  $F(\tau)$  с нижним пределом распределения  $\tau_0$ :

$$F(\tau) = P(\tau \leq \tau_i) = 1 - \exp[-k(\tau - \tau_0)] = N_t/N_a,$$

где  $N_a$  — число образцов, установленных на испытание;  $N_t$  — число образцов, оставшихся неповрежденными к моменту времени  $t$ ;  $\tau_0$  — время, при котором и ниже которого пробоев образцов не наблюдается.

Зависимость времени  $\tau_0$  при напряжении 20 кВ промышленной частоты от коэффициента неравномерности электрического поля приведена ниже:

$k_n \dots \dots$	300	50	20	15	8	5	3	1
$\tau_0 \dots \dots$	3,8	4,2	4,5	5,0	4,0	4,1	4,0	300

Из таблицы следует, что наименьшие сроки службы слабо зависят от степени неравномерности до значения  $k_n = 3$ . И только в диапазоне  $k_n = 1 \dots 2$  происходит резкое возрастание сроков службы.

Допустимая величина  $k_n$  была уточнена на основании опытов по исследованию зависимости времени до зарождения дендрита от максимальной кажущейся напряженности  $E_{\max}$ . Установлено, что при  $E_{\max} \leq 10$  МВ/м дендрит не зарождается: этот вывод получен по результатам испытаний 100 образцов в течение 1,5 тыс. ч.

Таким образом, в электроизоляционной конструкции рекомендуется подбирать такую степень неоднородности электрического поля, чтобы величина  $E_{\max}$  не превышала 10 МВ/м.

При длительном приложении постоянного напряжения компаунд не подвергался электрическому старению до значений напряженностей, близких к пробивным, когда начинается образование дендритов. Причем времени до пробоя на постоянном напряжении проходит на 2...3 порядка больше, чем при старении на переменном.

Отношение напряжения пробоя компаунда марки ЭЗК-31 на постоянном токе к пробую на переменном снижается от 1,6 при толщине диэлектрика 2 мм до 1,25 — при 6 мм. Эти изменения объясняются образованием объемного заряда в области резко неоднородного поля.

Наложение на постоянное напряжение пульсирующей составляющей снижает электрическую прочность и срок службы компаунда обратно пропорционально амплитуде пульсации.

При длительных испытаниях образцов с электродами игла — плоскость и макетов катушек трансформаторов было установлено, что электрическая прочность эпоксидной изоляции в резко неравномерном поле почти не зависит от частоты до 1000 Гц и от температуры до 80...90°С (при частоте до 500 Гц). Это позволяет утверждать, что в указанных частотных и температурных диапазонах происходит электрический пробой. Выбор изоляционных расстояний для конструкций с коэффициентом неравномерности электрического поля  $k_n \geq 4$  на повышенных температурах до 80...90°С может приблизительно производиться по результатам старения при температуре 20°С.

В области теплового пробоя для таких полей срок службы обратно пропорционален частоте и зависит от температуры изоляции. Введение наполнителя в виде ПКП улучшает условия теплопередачи и способствует повышению электрической прочности как при повышенной частоте, так и при импульсном напряжении.

При импульсном напряжении развитие канала пробоя происходит интенсивнее, чем при переменном, и зависит от полярности. В резко неравномерном поле эффект полярности на 20% больше, чем в равномерном. Это связано, по-видимому, с тем,

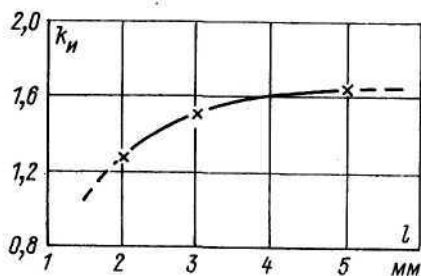


Рис. 2.11. Зависимость коэффициента импульса  $k_n$  от расстояния между электродами игла—плоскость

что разрушение диэлектрика при старении происходит под действием электронных лавин, локализованных в приэлектродной области, когда процесс не охватывает весь промежуток. Косвенным подтверждением такого механизма пробоя может служить возрастание импульсной прочности с уменьшением длительности импульса.

При уменьшении длительности импульса в 100 раз (от

$10^{-5}$  до  $10^{-7}$  с) пробивное напряжение компаунда увеличивается в 3...3,5 раза.

С увеличением числа воздействующих импульсов до  $10^6$  электрическая прочность в резко неравномерном поле снижается на 40% по сравнению с кратковременной прочностью, а в слабо неравномерном поле — на 30%.

Срок службы изоляции для импульсного напряжения при форме импульса 300/1500 мкс может быть выбран по кривой жизни для переменного напряжения. В этом случае амплитудные значения переменного и импульсного напряжений должны быть равны, а число полупериодов переменного напряжения — равно числу импульсов аperiodического импульсного напряжения.

На рис. 2.11 приведена зависимость коэффициента импульса  $k_n$  от расстояния между электродами игла — плоскость образцов из компаунда марки ЭЗК-31. Коэффициент импульса определяется как отношение напряжения пробоя при импульсе к напряжению пробоя при плавном подъеме напряжения промышленной частоты:  $k_n = U_n/U_{\sim}$ . Из кривой следует, что коэффициент импульса растет с увеличением толщины диэлектрика.

Пользуясь данной кривой, можно по значениям электрической прочности компаунда при частоте 50 Гц выбрать толщину изоляционного промежутка для импульсного напряжения с фронтом волны  $\tau_{\phi} = 120$  мкс, декрементом колебаний  $\Delta = 0,2$  и частотой 300 Гц.

Введение наполнителя ПКП увеличивает электрическую прочность на 15...20%.

Л. Д. Бобровской установлено, что средний срок службы для образцов игла — плоскость толщиной 3 мм слабо зависит от частоты до 35 кГц и подчиняется эмпирической закономерности  $\tau_{\text{ср}} = Af^{0,12}$ . Причем при  $f = 35$  кГц средний срок службы в два раза меньше, чем при промышленной частоте. Такое ускорение, в частности, неприемлемо для практического использования при определении срока службы. Было также найдено, что



увеличение частоты не приводит к образованию дендритов, но влияет на ускорение его развития.

Переходы от электрического дендрита к тепловому, что наиболее характерно при  $f = 15$  кГц, наблюдались при средней напряженности электрического поля 3,3 МВ/м.

При частоте 35 кГц рост теплового канала начинается без предварительного образования электрического дендрита.

Приведенные данные свидетельствуют о возможности эксплуатации оксидной изоляции при напряженностях электрического поля 1,5... 2 МВ/м при частоте менее 35 кГц.

### 2.2.2. Полиолефины и другие полимерные материалы.

Во многих работах, посвященных изучению природы отказов полимерной изоляции при кратковременных и длительных воздействиях электрического поля, важное место отводится исходным дефектам материала, обусловленным несовершенством технологии их производства.

Процесс старения полимеров сопровождается одновременно протекающими физико-химическими превращениями: деструкцией, структурированием, ориентацией, рекристаллизацией и др. Окисление полиолефинов имеет нелинейную связь скорости реакции накопления пероксидных соединений со скоростью образования активных центров. Поэтому уравнение Аррениуса является условным, характеризующим только температурное влияние на процесс старения.

В качестве дефектов, ответственных на развитие процессов разрушения твердых полимеров в электрическом поле, чаще всего рассматриваются места с локальным усилением напряженности электрического поля, например около электродов и неоднородностей в объеме диэлектрика, или места с пониженной электрической прочностью, например воздушные и газовые включения.

Работами группы В. Я. Ушакова [11] показано, что в ряде случаев канал пробоя может не проходить через исходные неоднородности, даже если они образуют цепочки, пересекающие весь межэлектродный промежуток.

Не столько концентрация, сколько размер этих неоднородностей, особенно находящихся в области повышенной напряженности поля, является определяющим фактором в развитии пробоя полимеров. Высокая напряженность поля на неоднородностях сама по себе также не является причиной пробоя, так как при малых размерах неоднородностей в них не развиваются частичные разряды, являющиеся основным фактором ускоренного разрушения неоднородных диэлектриков в электрическом поле.

Высокой чувствительностью начальных процессов разрушения полимеров характеризуются неоднородности структуры на молекулярном и надмолекулярном уровне. Последнее непосредственно следует из термофлюктуационной теории разрушения твердых тел.



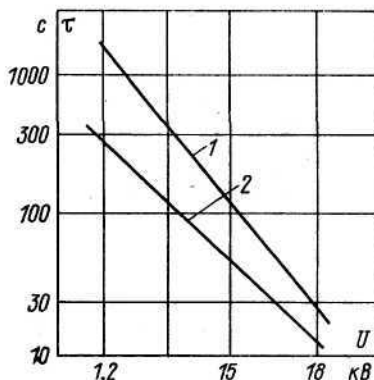


Рис. 2.12. Зависимость времени зарождения дендритов от напряжения для фторопласта-4 (кривая 1) и полиэтилена (кривая 2)

В качестве основных факторов разрушения полимеров рассматриваются разрывы химических связей за счет термоактивационных процессов с учетом активирующего действия носителей заряда и других вторичных факторов, обусловленных воздействием сильного электрического поля.

При этом, как следует из работ группы К. Н. Кана [10], помимо тепловых и химических воздействий, существенную долю в разрушение полимеров вносят и механические нагрузки.

Кроме отмеченных причин разрушения полимеров при длительном электрическом нагружении для полиэтилена, следует отметить также влияние продолжительности существования локальных объемных зарядов, которые приводят к значительному повышению напряженности в граничных областях при инжекции электронов из электродов.

При наличии значительных полостей разрушение полимерного материала ускоряется при увеличении частоты, амплитуды и длительности приложения напряжения. Основным фактором, влияющим на степень повреждения, является кинетическая энергия электронов. Срок службы полимера обратно пропорционален средней кинетической энергии бомбардирующих электронов.

Старение литьевого полиэтилена в течение 1 мес независимо от температуры переработки (180...280°C) приводит к 40%-ному разрушению гель-фракции, содержание которой монотонно снижается, достигая 30% через 12 мес. Одновременно происходит накопление карбонильных групп и развитие деструкционных процессов старения.

На полимерную изоляцию в процессе разрушения, помимо напряжения и температуры, влияют условия повышенной влажности, обуславливающие возникновение и развитие водных трингов.

Механические растягивающие напряжения, приложенные перпендикулярно направлению поля, ускоряют рост дендритов, в то время как приложенные в направлении поля — оказывают малое влияние.

На рис. 2.12 приведены экспериментальные данные испытания блочных материалов ПЭ и Ф-4 толщиной 2 мм,  $f \leq 260$  кГц между плоскими электродами, на одном из которых припаяна вольфрамовая игла с радиусом закругления 10 мкм для иници-

ирования образования дендрита. Испытания по определению зарождения дендритов производились по ступенчатой методике с выдержкой на ступени 1 мин, величина ступени 1 кВ. Регистрация момента зарождения дендрита осуществлялась регистрацией частичного разряда при чувствительности схемы  $10^{-13}$  Кл.

Из кривых рис. 2.12 видно, что время до зарождения дендритов для фторопластовой блочной изоляции больше, чем время для полиэтиленовой, причем с уменьшением времени зарождения эта разница будет увеличиваться.

По стойкости к процессам разрушения изоляции под действием частичных разрядов (рис. 2.13) фторопласт оказывается хуже полиэтилена при большей стойкости к образованию дендритов. Объяснить это явление можно более высокой химической активностью газов, выделяемых в канале дендрита фторопласта.

Если технология изготовления монолитного фторопласта более надежно обеспечивает отсутствие микро- и макродефектов, то именно этот материал и необходимо использовать.

### 2.2.3. Керамика, лейкосапфиры.

В керамике возможны три вида пробоя: электрохимический, электрический и тепловой.

Электрохимический пробой происходит при постоянном или при переменном напряжении низкой частоты, когда в керамике развиваются электролитические процессы, обуславливающие необратимое уменьшение сопротивления изоляции. Рост проводимости вызывает лавинообразное нарастание температуры диэлектрика, завершающееся тепловым пробоем первого вида.

Такой вид пробоя возможен при модулированном напряжении и наличии постоянной составляющей.

Тепловой высокочастотный пробой делится на два рода. Тепловой пробой первого рода возникает в том случае, если энергия, выделяющаяся за счет диэлектрических или джоулевых потерь, превышает энергию, способную рассеиваться в данных условиях.

Если рассеяние энергии в окружающую среду становится равным выделению ее в толще диэлектрика, температура образца стабилизируется.

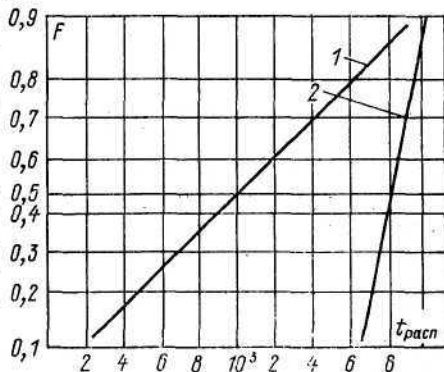


Рис. 2.13. Кривые распределения времени развития дендритов при  $E_{ср} = 5$  МВ/м для фторопласта-4 (кривая 1) и полиэтилена (кривая 2, логарифмически-нормальное вероятностное распределение)

Напряженность электрического высоковольтного поля при тепловом пробое и наличии перепада температур в толще пластины бесконечной длины можно определить из выражения

$$E = 3,87 \cdot 10^9 \sqrt{(t_{\max} - t_n) k / (\epsilon f \operatorname{tg} \delta) N},$$

где  $t_{\max}$  и  $t_n$  — максимальная температура в середине пластины и на ее поверхности:  $N = \sqrt{k_1 \lambda' h^2 + 2hk(\lambda'm + k_1)}$  — коэффициент, зависящий от размеров образца и условий охлаждения;  $k$  и  $k_1$  — коэффициенты теплопроводности диэлектрика и электрода;  $\lambda'$  — коэффициент внешней теплоотдачи.

Если предположить, что  $t = t_{кр}$  для диэлектрика, то с помощью данного выражения можно определить напряженность поля, при котором наступит нарушение теплового равновесия.

Для образцов плоской формы с электродами, которые образованы посеребрёнными лунками с толщиной стенок 1...2 мм, напряженность теплового пробоя и критическая температура при  $t = 20^\circ \text{C}$  на постоянном напряжении представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Марка (тип) керамики	$E_{пр}$ , МВ/м	$t_{кр}$ , °C	$\rho$ , $\times 10^{13}$ , Ом·м
КМ-1 (корундомуллитовый)	45	50	3
РФ (муллитовый)	30	180	13
Б-17 (стеатитовый)	29	220	8
Ш-15 (шпинели)	28,5	400	40
УФ-46 (корундовая)	27,5	150	4
СЦ-4* (стеатитовая)	22,5	150	3

\* Отличается от Б-17 наличием оксида.

Из таблицы видно, что стеатит марки Б-17, получивший наиболее широкое применение в промышленности, характеризуется достаточно высокой электрической прочностью и критической температурой.

Стеатитовая керамика марки Б-17 имеет  $\operatorname{tg} \delta$  ( $f = 50$  Гц), равный 0,0006 — при  $20^\circ \text{C}$ , 0,0007 — при  $100^\circ \text{C}$ , 0,00075 — при  $200^\circ \text{C}$ ;  $\epsilon = 6 \dots 8$  (при 0,5...1 МГц);  $\rho = 10^{13}$  Ом·м; предел прочности на изгиб 140...150 МПа, временное сопротивление на растяжение 47 МПа; ударную прочность 2,8...3 МПа;  $\text{ТКЛР} = (7 \dots 7,5) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ .

Напряженность теплового пробоя мало зависит от температуры в пределах до  $200^\circ \text{C}$  и составляет 10...12 МВ/м. Таким образом, на высокой частоте керамика марки Б-17 в пределах рабочих температур имеет высокие электрические характеристики.

Следует учесть, что электрическая прочность керамики на высоких частотах зависит от ее пористости.

В электромагнитном поле внутренние части керамических деталей нагреваются до более высокой температуры, чем внешние, и, стремясь расширяться, растягивают их. Таким образом, внутренние области оказываются в сжатом состоянии, а наружные — в растянутых.

Эти термоупругие напряжения зависят от напряженности электромагнитного поля, характеристик материала или от молочно-литно связанных нескольких материалов, размеров и формы изделия.

Термоупругие напряжения способствуют процессам рекристаллизации и росту микротрещин, в связи с чем снижаются электрическая и механическая прочность материала. Термоупругие напряжения являются основной причиной старения керамики в высокочастотном поле. Чем больше суммарные механические напряжения, действующие в материале, тем скорее он разрушается.

Этот механизм разрушения является разновидностью теплового пробоа второго рода, характерного для керамики, лейкосапфира и других твердых диэлектриков, и может быть назван термоупругим пробоем (ТУП). Посредством расчета такого пробоа можно определить напряжения высокочастотного теплового пробоа, а также вычислить скорость старения и срок службы керамических деталей в сильных переменных полях.

Можно рассчитать и сравнить максимальные термоупругие напряжения  $\sigma_p$  на поверхности деталей различной формы при одинаковом удельном тепловыделении  $Q$ , которое предполагается постоянным по всему объему при равномерном электрическом поле, когда  $k_n < 3 \dots 4$  (работы Ю. М. Волокобинского).

Например, когда диаметр шара равен диаметру стержня и толщине пластины, напряжения на поверхностях вычисляются по формулам:

$$\sigma_{p,ш} = (1/30)B; \quad \sigma_{p,ст} = (1/16)B; \quad \sigma_{p,п} = (1/16)B,$$

где  $B = [(1 + \mu)/(1 - \mu)](QD^2/k)\alpha G$ ;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\alpha$  — ТКЛР;  $G$  — модуль сдвига, Па;  $k$  — коэффициент теплопроводности диэлектрика, Вт/(м·К);  $Q$  — удельное тепловыделение, Вт/м<sup>3</sup>;  $D$  — диаметры шара, стержня и толщина пластины, м.

При одинаковом удельном тепловыделении  $Q$  термоупругие напряжения на поверхности пластин, стержня и шара относятся друг к другу как  $\sigma_{p,п} : \sigma_{p,ст} : \sigma_{p,ш} = 40 : 15 : 8$ .

Раскалывание керамических, стеклянных, ситалловых и т. п. деталей происходит, когда растягивающие напряжения на поверхности достигают разрушающего значения  $\sigma_p$ , при этом максимальные перепады температуры в шаре, в стержне и в пластине будут:

$$\Delta t_{ш} = (5/4)C; \quad \Delta t_{ст} = C; \quad \Delta t_{п} = (3/4)C,$$

где  $C = [1 - \mu/(1 + \mu)]\sigma_p/(\alpha G)$ .

Таким образом, разрушение в пластине, стержне и шаре произойдет при следующем отношении перепадов температур:  $\Delta t_n : \Delta t_{ст} : \Delta t_{ш} = 3 : 4 : 5$ , т. е. разрушающий перепад температур зависит в основном от механической прочности материала и в меньшей степени — от формы деталей.

Напряженность электрических полей, вызывающая раскалывание радиодеталей, зависит от их размеров и формы, от условий охлаждения, характеристик самого диэлектрика, монолитно с ним соединенных других материалов и от частоты электрического поля. Влияние характеристик материалов и частоты на напряженность разрушающего электрического поля можно учесть с помощью коэффициента

$$M = \sqrt{k(1-\mu)\sigma_p / (\varepsilon \operatorname{tg} \delta / \alpha E'_y)},$$

где  $E'_y$  — модуль упругости;  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  — диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь при средней температуре в диэлектрике  $t_{ср}$ , которая зависит от условий охлаждения.

Зная  $E_p$ , можно вычислить разрушающее напряжение стержневого изолятора с радиусом  $R$  и длиной  $l$ :

$$U_p = E_p l = 3,8 \cdot 10^5 M l / R.$$

Охлаждаемые с наружной поверхности трубчатые изоляторы раскалываются, когда к ним приложено напряжение

$$U_p = \frac{3,8 \cdot 10^5 M l}{[R^2 - 3r^2 + 4r^2(k^2 - r^2) \ln(R/r)]^{1/2}}, \quad (2.1)$$

где  $r$  и  $R$  — радиусы внутренней и внешней поверхности изолятора;  $l$  — высота изолятора.

При охлаждении внутренней и внешней поверхности трубчатый изолятор раскалывается при напряжении

$$U_p = \frac{3,8 \cdot 10^5 M l}{[R^2 + r^2 - (R^2 - r^2) / \ln(R/r)]^{1/2}}. \quad (2.2)$$

Напряженность электрического поля в диэлектрическом шаре с радиусом  $R$ , при которой происходит его разрушение, вычисляется по формуле

$$E_p = 5,2 \cdot 10^5 M / R. \quad (2.3)$$

Численные значения коэффициента  $M$ , входящего в формулы (2.1) ... (2.3), несколько различаются между собой, так как зависят от средней температуры в диэлектрике.

Кроме того, при наличии металлической арматуры или других материалов, монолитно связанных с керамикой, лейкосапфиром, ситаллом или другим диэлектриком, величина  $\sigma_p$ , входящая в уравнение для  $M$ , уменьшается на значение термоупругих напряжений  $\sigma_{ТУН}$ , которое вносят указанные материалы за счет

разности значений ТКЛР, модулей Юнга и коэффициента Пуассона с диэлектриком.

Под действием постоянного напряжения электрическая прочность лейкосапфиров составляет 6...8 МВ/м. При сверхвысоких частотах электрическая прочность сокращается в 3 раза. Электрическая прочность материалов сильно зависит от его пористости.

2.2.4. Электрическая прочность при механическом нагружении.

При исследовании кратковременной электрической прочности эпоксидных компаундов замечено снижение пробивной напряженности электрического поля при уровнях механических напряжений в образцах примерно  $(0,4 \dots 0,45)\sigma_b$  или 30,0...35,0 МПа. Например, для эпоксидного компаунда марки ЭПК-5 при уровне механических напряжений  $\sigma_p = 0,6\sigma_b = 47,5$  МПа пробивная напряженность электрического поля составляет  $(0,9 \dots 0,87)E_{пр}$ . Оценка снижения пробивной напряженности электрического поля при уровнях механических напряжений меньше  $0,4\sigma_b$  затруднена вследствие разброса экспериментальных данных.

Механические напряжения увеличивают число и размеры внутренних дефектов в эпоксидных компаундах, снижают напряжение начала частичных разрядов во внутренних микрополостях (порах, дефектах) за счет уменьшения в них давления и увеличения их размеров.

Одной из причин механического разрушения образца при пробое является резкое повышение давления в канале пробоя при электрическом разряде в нем. Весьма существенное влияние оказывает и характер пробоя, древовидные побеги которого в большинстве случаев охватывают довольно большую область вокруг канала пробоя и играют роль инициированной быстрой трещины.

Результаты исследования долговечности эпоксидных компаундов при совместном нагружении для различных сочетаний механической и электрической нагрузок от  $0,5\sigma_b$  и  $0,5E_{пр}$  до  $0,8\sigma_b$  и  $0,8E_{пр}$  представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Механическое нагружение		Электрическое нагружение		Совместное нагружение	
Уровень напряжения $\sigma_p/\sigma_b$	Долговечность, ч	Уровень нагруженности $E_p/E_{пр}$	Долговечность, ч	Уровень напряжения $\sigma_p/\sigma_b$ и напряженности $E_p/E_{пр}$	Долговечность, ч
0,5	354	0,5	293	0,5	15,0
0,6	45,3	0,6	63	0,6	0,62
0,7	7,48	0,7	18,2	0,7	0,15
0,8	0,65	0,8	0,28	0,8	0,002



Данные получены при пределе механической прочности  $\sigma_b = (79,0 \pm 2,8)$  МПа, пробивной напряженности электрического поля  $E_{пр} = 5,0$  МВ/м при толщине образца  $1 \cdot 10^{-3}$  м.

Характер процесса разрушения при длительном электрическом и механическом нагружении будет иным.

Механические напряжения увеличивают в образце размеры и количество внутренних дефектов, а электрическое поле увеличивает кинетическую подвижность элементов структуры эпоксидного компаунда, что облегчает механическое разрушение диэлектрика.

Увеличение скорости разрушения эпоксидных компаундов снижает долговечность при различных уровнях внешних нагрузок, о чем свидетельствуют данные табл. 2.4.

Все это подтверждает кинетическую концепцию прочности полимерных материалов, согласно которой внешние силы создают условия для необратимого разрыва межатомных связей тепловыми флюктуациями. Долговечность можно определить из уравнения

$$\tau_p = A \exp(-a\sqrt{\sigma^2 + \mu E^2}),$$

где  $A$  и  $a$  — параметры временной зависимости механической прочности при постоянной температуре;  $\mu = 1,7$  [МПа/(МВ/м)]<sup>2</sup> — коэффициент приведения электрического поля к механическому для компаунда марки ЭПК-5;  $\sigma_p$  — в МПа;  $E$  — в МВ/м. Величину  $\sigma_{эkv} = \sqrt{\sigma^2 + \mu E^2}$  можно интерпретировать как эквивалентное механическое напряжение.

Влияние механического нагружения было успешно использовано в качестве ускоряющего фактора при электрических и тепловых испытаниях компаундов. Обнаружено влияние механической нагрузки на снижение кратковременной и длительной электрической прочности также в слюдоэпоксидной изоляции.

Е. И. Глобусом показано наличие значительных структурных изменений при воздействии факторов старения, не связанных с термоокислением, а зависящих от статической усталости полиэтилена, т. е. от внутренних механических (термоупругих) напряжений.

Отмечается также и обратное влияние характера электрической нагрузки на механическую прочность, когда использование диэлектрика с равномерной в электрическом отношении нагрузкой для терморезистивного материала позволило получить изоляцию, имеющую более высокие механические характеристики.

Выявлено также в образцах ПЭВД ввиду образования на стадии технологической обработки неодинаковых участков механических напряжений и формирования пространственно неоднородной поляризации, наличие внутренних электрических полей. Установлена взаимосвязь между значениями механических напряжений в диэлектриках и внутренними напряженностями электрического поля. Ранние отказы обусловлены существованием

значительной напряженности  $E_{вн}$ , которая образуется при технологической обработке полимерных материалов.

Некоторые авторы рекомендуют во избежание разрушения полимеров соблюдать граничные тепловые, электрические и механические условия.

Циклические механические нагрузки приводят также к снижению электрической прочности полимерной изоляции в зависимости от числа циклов.

Для полиэтилена и стеклоэпоксидного пластика было найдено, что в зоне упругой деформации при растяжении электрическая прочность пробоя снижалась, а при сжатии — увеличивалась.

Приведенные результаты исследований показывают тесную взаимосвязь между электрическим и механическим нагружением и прочностными свойствами и старением полимерной изоляции. То же было показано для керамической, ситалловой и других типов твердой изоляции.

В общем виде эти закономерности были сформулированы В. Е. Гулем [12]; в пределах одного физического состояния полимер разрушается при условии, что подведенная энергия превышает суммарную энергию связей, противостоящих разрушению тела и оставшихся неразрушенными флюктуацией тепловой энергии.

### 2.3. КОРОНОСТОЙКОСТЬ И ДУГОСТОЙКОСТЬ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Допустимую рабочую напряженность электрического поля на поверхности изоляционной конструкции, а следовательно, и ее массогабаритные показатели и надежности определяют в зависимости от стойкости полимерной изоляции к поверхностным частичным разрядам и к образованию трещин.

Необходимость определения стойкости к поверхностным частичным разрядам (ПЧР) возрастает в случае применения новых высокочастотных полимерных материалов.

Как показали многолетние работы М. П. Кокуркина, исследование ПЧР на повышенных частотах дает разнообразную информацию, в том числе и о возможности проведения ускоренных испытаний на ПЧР.

Основным разрушающим фактором при действии ПЧР является электронная бомбардировка твердого диэлектрика, под влиянием которой возникает и развивается эрозия. Различают три вида разрушения: относительно равномерную эрозию поверхности, образование полости в толще диэлектрика, развитие трещин на поверхности материала.

Поверхностные частичные разряды возникают, как правило, в зоне тройного сопряжения («воздушном клине»).

Характер разрушения электроизоляционных материалов изменяется в зависимости от интенсивности разрядов. С увеличе-

нием напряжения и частоты характер разрушения меняется, переходя от одного вида к другому.

Рост интенсивности ПЧР приводит к увеличению роли тепловых процессов в разрушении и к изменению вида разрушения. У термостойких материалов с минеральным наполнителем возникают науглероженные области возле электрода, у термопластичных и эпоксидных компаундов без наполнителя появляются полости сферической или близкой к ней формы.

Виды разрушения зависят также от тепловых характеристик материала и условий теплопередачи во внешнюю среду. Критерием перехода от одного вида разрушения к другому может служить температура нагрева (перегрева) поверхности материала под действием ПЧР. В работе [13] показано, что установившаяся температура

$$t_{уст} = \frac{7,25\xi Q_{в} f^{1,5}}{l\rho C_p (4\pi\lambda)^{1,5}},$$

где  $\rho$  — плотность диэлектрика;  $\lambda$  — коэффициент температуропроводности;  $Q_{в}/l$  — число электронов в единичном частичном разряде  $\xi_{ср}$  — средняя энергия электронов.

В качестве параметра, характеризующего стойкость диэлектрика к действию ПЧР, предложено использовать количество энергии ПЧР, затраченной на разрушение единицы объема диэлектрика, т. е. удельную энергию разрушения материала;

$$W_p = P_{ч.р} \tau \kappa / V,$$

где  $P_{ч.р}$  — плотность мощности ПЧР;  $\tau$  — время испытаний;  $\kappa$  — доля энергии ПЧР, затрачиваемая на разрушение диэлектрика;  $V$  — объем кратера эрозии. Энергия  $W_p$  является индивидуальной характеристикой материала, не зависящей от условий испытаний.

Исследование ПЧР для рассматриваемых диэлектриков в промежутке игла — диэлектрик — плоскость, на который подавалось переменное напряжение с действующим значением 5,2 кВ, проводилось на частоте 40 кГц. Толщина образца принималась 2 мм.

Для исключения появления ПЧР изоляционные конструкции обычно эксплуатируются при напряженности электрического поля, значительно меньшей, чем напряженности образования ПЧР в воздухе. Как видно из табл. 2.5, использование таких диэлектриков, как фторопласт и полиэтилен, имеющих низкую стойкость к воздействию ПЧР, возможно только при напряженностях электрического поля, исключающих появление ПЧР, или с заранее оговоренным малым сроком службы. В то же время компаунд марки ЭТЗ-16, который характеризуется также высокой теплостойкостью, при частоте до 40 кГц имеет сравнительно высокую энергию разрушения и может работать при периодическом возникновении ПЧР.

Таблица 2.5

Диэлектрик	$\tau_{\text{ср}}$ , мин	$W_p$ , Дж/мм <sup>3</sup>
Политетрафторэтилен	87	1,2
Полиэтилен	157	1,9
ЭЗК-31	146	1,9
ЭЗК-14	134	2,0
ЭХД	261	2,8
ЭТП-16	470	5,2
ЭЗК-10	820	8,5
СК-13	1530	15,4
ТЭК-2	1310	15,4
ЭТЗ-16	2295	22,6

При установке высоковольтной аппаратуры в периодически отапливаемых помещениях на поверхности конструкции возможно образование инея, росы или капель влаги. В этих случаях необходимо предупредить образование трещин.

Низкая стойкость стеклопластиков к действию ПЧР объясняется наличием на поверхности не защищенных связующим материалом (полимером) стеклянных волокон. На них накапливаются грязь и влага, которые резко понижают поверхностное сопротивление и при высоком напряжении приводят к образованию трещин.

Возникновение трещин при воздействии ПЧР исследовано также на циклоалифатических эпоксидных компаундах марки УП-612; УП-632; ЭД-20. Результаты исследований методами масс-спектрометрии позволяют считать, что такие компаунды под влиянием дуговых поверхностных разрядов разрушают, причем наиболее вероятно термоокислительная деструкция.

В значительной степени стойкость полимеров к ПЧР характеризуется уменьшением их массы и способностью к коксовости, определяемой коксовым остатком. С уменьшением содержания в полимере коксового остатка снижается вероятность образования токопроводящей науглероженной дорожки.

Повышение трекинговой стойкости, например, стеклопластиков, может быть достигнуто применением полиуретанового лака УР-293 или эмали УР-1161. Причем с повышением толщины покрытия в пределах 10...210 мкм трекинговая стойкость возрастает.

Дугостойкость ненаполненных высокочастотных термопластов при токе 10 мА в соответствии с ГОСТ 10345.1—78 (метод 3) имеет следующие значения:

5...10 с (загорается) — для полиэтилена марок ПЭНД и ПЭВД;

10...30 с (загораются) — для поли-4-метилпентена-1;

20...40 с — для полиамида;

180 с — для фторопласта-4.

Появление грязи и влаги способствует интенсивному разрушению поверхности полимерной изоляции под действием частичных, скользящих и дуговых разрядов или поверхностных пробоев.

Прямое воздействие частичных разрядов на изоляционную поверхность вызывает разложение органических материалов. Бомбардировка электронами и ионами приводит к деструкции и к испарению составляющих компаунда с малой молекулярной массой. Степень воздействия короны на изоляцию зависит от энергии разряда, концентрирующегося на небольшом локальном участке.

При исследованиях образцов компаунда из смолы марки ЭД-5 и ЭДЛ, наполненных ПКП, в условиях длительного воздействия коронных разрядов на поверхности наблюдалась деструкция связующего и появление слоя кварцевого песка.

Слой кварцевого песка препятствует дальнейшему разрушению компаунда в нижележащих слоях. При напряженности выше 4,5...6 МВ/м защитное действие кварцевого песка не успевает проявиться и пробой наступает достаточно быстро.

Полиэфир-220, как и прочие пластификаторы, снижает срок службы компаунда и стойкость его к поверхностным разрядам.

Наиболее стойкими к поверхностным разрушениям, и в том числе действию солнечной радиации, проявили себя компаунды на основе циклоалифатических смол марок СУ-175, УП-612 и других, с наполнителем гидрата оксида алюминия. У этих компаундов под действием дуги не образуется сплошной науглероженный след (трек). Углерод, который выделяется в небольших количествах, сгорает в зоне дуги, а отщепленный водород увеличивает газогенерацию и способствует отталкиванию дуги от поверхности диэлектрика. Аналогичные результаты были получены отечественными и зарубежными авторами.

По трекинговости компаунды, в зависимости от марки содержащихся в них смол, располагаются в такой последовательности: циклоалифатические, алифатические, циклоацетальные, диановая ЭД-6, эпоксифурановая, диановая ЭД-5.

Благоприятное воздействие на трекинговость оказывает использование в качестве отвердителя полиэтиленполиамина.

Наибольшей дугостойкостью обладают компаунды на основе смолы ЭД-6, а наименьшей — на основе эпоксифурановой смолы. Лучшие результаты получены при использовании наполнителя марки ПКП-2.

Положительный эффект от введения наполнителя обнаруживается, если частицы имеют диаметр менее 5 мкм. Стойкость к разрядам обратно пропорциональна размерам частиц наполнителя.

В табл. 2.6 приводятся данные по определению капельным методом МЭК трекинговости наполненного пылевидным кварцевым песком оксидного компаунда, поверхность кото-

Таблица 2.6

Вид обработки	Относительный показатель, В
Дробеструйная для снятия остатков антиадгезионной смазки	200
Шлифовка	250
Пескоструйная	230
Покрытие лаком марки:	
ПКЭ-22	200 ... 300
ГФ-92ГС	250
на основе ЭД-6	310

рого подвергалась различной обработке. При различных напряжениях на поверхность наносилось по 50 капель 0,1 %-ного раствора  $\text{NH}_4\text{Cl}$  до образования трека.

Лучший относительный показатель, определенный как наибольшее напряжение, при котором образовался трек, получен при покрытии лаком на основе смолы ЭД-6.

Обращает на себя внимание отрицательное влияние дробеструйной обработки, что вызвано следами металлической пыли, которые оставляют дробь на поверхности компаунда. Очевидно, что этот вид обработки для поверхности эпоксидного компаунда противопоказан.

#### 2.4. ПОЛУПРОВОДЯЩИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Полупроводящие (ППМ) и металлизированные полимерные материалы широко применяются для замены металлических электромагнитных и электростатических экранов, экранирования высоковольтных и высокочастотных кабелей, для противокоронной защиты и т. д.

Полупроводящие полимерные материалы (ППМ) и металлизированные полимерные материалы успешно используются в качестве полимерных электродов в высоковольтных конструкциях.

Многофункциональное применение таких электродов объясняется не только способностью заменить дефицитные цветные металлы, но и идеальной совместимостью с полимерным материалом тела изолятора вследствие одинаковых значений ТКЛР; модулей Юнга и коэффициента Пуассона, химической совместимостью материалов. Создание систем изоляции с полимерными электродами избавляет от возникновения в монолитных высоковольтных конструкциях опасных термоупругих напряжений, а следовательно, и возникновения трещин в теле изолятора и отслоений электродов.

Положительное влияние повышенного удельного сопротивления ППМ или полупроводящих полимерных покрытий связано



также с затруднением подтекания зарядов к краям полупроводящей системы, т. е. к месту возникновения короны, что ослабляет процесс ионизации и повышает напряжение разряда. Предполагают [14], что возрастание удельного сопротивления может повысить энергию, необходимую для вырывания электронов с полупроводящего электрода, и соответственно поднять начальное напряжение короны и поверхностного пробоя.

Для изоляционных конструкций в форме плоского конденсатора напряжение возникновения ПЧР можно определить из уравнения

$$U_0 = K/(\Delta/\epsilon)^{0,45},$$

где  $\Delta$  — толщина диэлектрика, мм;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость. Коэффициент  $K$  для начального напряжения короны в воздухе при металлических и полупроводящих электродах возрастает с 3 до 4,3.

Таким образом, напряжение появления короны для полупроводящих электродов при достаточном значении сопротивления возрастает почти на 40%.

При высоких напряжениях целесообразно делать сопротивление двухступенчатым:  $10^3 \dots 10^6$  Ом — на первой ступени и  $10^{10} \dots 10^{11}$  Ом — на второй.

Напряженность электрического поля у края экрана не должна превосходить 2 МВ/м.

Большинство полимеров имеет удельное объемное сопротивление  $10^{11} \dots 10^{14}$  Ом·м. Это сопротивление в электропроводящих композициях путем дисперсных наполнителей, в том числе сажи, технического углерода, графита, углеграфитовых волокон или порошков металлов, можно довести до  $\rho = 10^{-3}$  Ом·м. При использовании углеродных наполнителей получены материалы с удельным сопротивлением порядка  $10^{-3}$  Ом·м, при использовании металлических наполнителей — порядка  $10^{-6}$  Ом·м.

Проводимость полимерных материалов, содержащих электропроводящие наполнители, зависит от расположения наполнителей относительно друг друга и от контактного сопротивления между соседними частицами.

Эффективным способом повышения проводимости могут явиться полупроводящие полимеры на основе оксидных компаундов, у которых в качестве армирующей основы используется асбестовая ткань, наполненная сажой. Благодаря высоким адсорбционным свойствам асбестовых волокон повышается группирование частиц сажи на асбестовых нитях, что значительно облегчает образованию непрерывных цепей из контактирующих частиц проводящего наполнителя. Этот эффект при использовании асбестовой ткани обеспечивает получение при одном и том же саженаполненном компаунде удельного объемного сопротивления материала на 1...2 порядка ниже, чем при использовании стеклянной ткани.

Материалы с широким спектром электрических характеристик, в том числе имеющих определенные диэлектрические характеристики при различных частотах, могут быть получены на основе сажи в виде эластичных компаундов.

Электрические свойства компаундов определяются размерами частиц, величиной удельной поверхности и размерами агрегированных частиц при адсорбции дибутилфталата. Проводимость увеличивается при уменьшении размеров частиц, увеличении площади их поверхности или структурированности, а также при уменьшении содержания кислорода. Минимальная объемная доля сажи, при которой наблюдается проводимость, определяется по формуле

$$V_c = 1/(1 + 4j\gamma),$$

где  $j$  — плотность;  $\gamma$  — объем поглощения дибутилфталата, измеренный по стандартной методике.

Зависимость электрического сопротивления от концентрации для различных типов саж в полиэтилене низкой плотности имеет разброс пороговой концентрации от 4 до 75%.

Для двух видов саж эффект смещения может быть определен из уравнения для критического объема сажи:

$$V_c = \frac{1}{1 + 4d[\gamma_A - x + \gamma_B(1 - x)]},$$

где  $\gamma_A$  и  $\gamma_B$  — количество адсорбированного дибутилфталата на 100 г саж  $A$  и  $B$ ;  $x$  — массовая доля сажи  $A$ .

Использование смесей саж позволяет получить компаунды с более стабильной электрической проводимостью с различными механическими свойствами.

Таблица 2.7

Наполнитель	Содержание, %	Временное сопротивление на растяжении, МПа	Динамический модуль упругости, Па	Теплостойкость по Вика, °С
Карбонильное железо	0	13,5	157	110
	20	10,6	208	110
	40	13,4	197	123
	60	13,9	242	115
	80	15,3	381	119
Медь	20	11,2	269	110
	40	12,5	302	110
	60	9,6	350	111
	80	8,2	—	112
Железо ПЭНЗ	20	10,3	312	107
	40	7,9	—	107
	60	6,0	520	110
	80	4,0	—	114

Полупроводящие композиции на основе марки ПЭВД с 20, 40, 60 и 80% металлических порошков получают путем их смешения на вальцах при 190° С в течение 15...20 мин. Затем их измельчают на ножевой дробилке. Свойства таких композиций приведены в табл. 2.7.

Как следует из таблицы, оптимальные характеристики полупроводящих композиций по механической прочности и по теплоустойчивости ПЭВД с карбонильным железом имеет при содержании наполнителя 60...80%, с медью — 40%, с железом ПЖЗ — 20%.

На сопротивление полупроводящих полимерных материалов и покрытий оказывают влияние деформации материалов, и чем больше эти деформации, тем существеннее изменение сопротивления.

Иногда после паузы сопротивления могут возвратиться к значениям, близким первоначальным, т. е. имеют гистерезисный характер.

Соотношения удельного сопротивления и температуры полупроводящих композиций сильно различаются в зависимости от материала матрицы, наполнителя и типа распределения проводящего материала.

Набухание полупроводящих материалов всегда приводит к увеличению удельного сопротивления вследствие увеличения расстояния между частицами. После улетучивания вещества, вызвавшего набухание, первоначальная проводимость обычно восстанавливается.

В процессе старения полупроводящие полимерные материалы, как правило, увеличивают значение проводимости  $\rho$ , особенно в течение первого периода старения. Иногда такое увеличение для ППМ на основе полиэтилена и эпоксидных компаундов может изменяться в несколько раз. Затем оно в течение длительного периода практически остается постоянным.

Для металлизации полимерных материалов применяют методы шоопирования, вакуумное напыление и химическую металлизацию, методы электроадгезии и др. В качестве основных материалов используются цинк, медь, серебро. Экономичным и технологичным способом нанесения цинка и меди является метод шоопирования, который на таких материалах, как эпоксидные компаунды и стеклоэпоксидные пластики, дает надежное в механическом и климатическом отношении покрытие.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ И ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ

### 3.1. ПРОБОЙ В ВОЗДУХЕ И ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ НА ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ И ПРИ ЧАСТОТЕ 50...400 Гц

**Пробой в воздухе.** Учитывая практическую направленность данной работы, не представляется целесообразным приводить глубокие исследования электрического пробоя в воздухе на постоянном напряжении и при промышленной частоте.

При современных методах разработки систем изоляции, основанных на широком применении вычислительной техники, обеспечивающей определение напряженности электрического поля на электродах и в любой точке между ними, требуются экспериментальные данные о пробое в зависимости от геометрии электродов и расстояний между ними.

Электрическое поле постоянного тока в изоляции определяется полем токов проводимости. В таком электрическом поле имеет место также движение заряженных частиц, которые могут приводить к накоплению у электродов зарядов и искажать первоначальное значение формы электрического поля. Возникновение условий образования самостоятельного разряда и поверхностных частичных разрядов (ПЧР) в промежутках с однородным электрическим полем совпадает с разрядным. Существование равномерного электрического поля при  $k_n = 1$  в реальных конструкциях мало вероятно. Рассматривается обычно слабо неравномерное электрическое поле, у которого коэффициент неравномерности  $k_n = E_{\max}/E_{\text{ср}} \leq 3 \dots 4$ .

В слабо неравномерных полях эффективный коэффициент ударной ионизации  $\alpha_{\text{эф}} > 0$  имеет место по всей длине промежутка, что практически связано с одновременным возникновением ПЧР и пробоя.

В резко неравномерном поле возникновение ионизации  $\alpha_{\text{эф}} > 0$  происходит около электрода, в узкой области максимальной напряженности, соответствующей минимальному радиусу кривизны. Пробою предшествует появление короны.

Для расчетов значений разрядных напряженностей воздушных промежутков в равномерном электрическом поле удобно воспользоваться формулой

$$E_0 = 2,45\delta + 6,4\sqrt{\delta/l},$$

где  $\delta = pT_0/(Tp_0)$ ;  $p$  и  $T$  — давление и температура воздуха в расчетных условиях;  $p_0 = 101,3$  кПа;  $p = 1010$  кПа;  $T_0 = 293$  К — нормальные атмосферные условия.

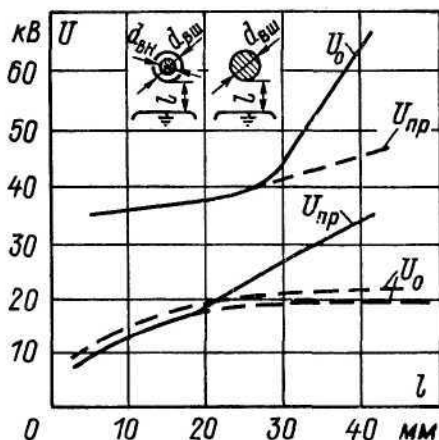


Рис. 3.1. Напряжения начала коронирования  $U_0$  и пробоя  $U_{пр}$  цилиндров ( $d_{вн}=d_0=2,7$  мм;  $d_{вн}=1,5$  мм) с диэлектрическим покрытием (сплошные кривые) и без покрытия (штриховые кривые) относительно плоскости в зависимости от воздушного зазора  $l$  при  $f=400$  Гц

При нормальных атмосферных условиях и  $l = 10$  мм напряженность электрического поля при разряде  $E_0 = 3,09$  МВ/м, а при увеличении длины промежутка значение  $E_0$  снижается, приближаясь к 2,45 МВ/м.

Для различных типов промежутков можно рекомендовать определение начальной напряженности по формуле

$$E_0 = 2,45\delta [1 + (0,4 + 0,24m) / (\delta l)^{0,4}],$$

где  $l$  — расстояние, отсчитываемое вдоль силовой линии от центра кривизны;

$$m = \ln [E(r)/E(r_0)] / \ln (r_0/r)$$

— отношение напряженностей на поверхности электрода и в любой точке силовой линии;  $r_0$  — радиус кривизны поверхности электрода. В равномерном поле  $m = 0$ , в поле коаксиальных электродов  $m = 1$ ; в поле уединенной сферы  $m = 2$ .

На практике значение  $m$  определяют только в зоне ионизации, т. е. в точке минимального радиуса кривизны электрода, где проходит кратчайшая (центральная) силовая линия.

Для ориентировочного расчета пробивного напряжения промышленной частоты при нормальных атмосферных условиях для электродов простейшей формы можно рекомендовать для амплитудного значения между электродами следующие уравнения: плоскость — плоскость при  $l$  от 10 до 200 мм

$$E_{пр} = 2,45\delta (1 + 0,28/\sqrt{l\delta}); \quad U_{пр} = E_{пр}l;$$

соосных (коаксиальных) цилиндров в слабо неравномерных полях  $R/r \leq 10$

$$E_{пр} = 31\delta [1 + 0,308/(r\delta)],$$

где  $r$  и  $R$  — радиусы внутреннего и внешнего цилиндров; параллельных цилиндров при  $l/r \leq 30$  в слабо неравномерных полях

$$E_{пр} = 3,0\delta [1 + 0,301/(r\delta)];$$

$$U_{пр} = E_{пр} \{ (l - 2r) / \sqrt{[l/(2r)]^2 - 1} \} \operatorname{arch} [l/(2r)].$$

В табл. 3.1 приводятся напряжения образования ПЧР для типовых элементов конструкции. Значение определялось по началу видимого свечения в затемненной камере при частоте 400 Гц.

Таблица 3.1

Тип промежутка	Диаметр электрода, мм	Значение напряжения, кВ, образования ПЧР при расстоянии между электродами, мм, равно					
		5	10	20	40	60	80
Цилиндр—плоскость	2	10	14	18	20	—	—
	3	12	18	20	25	28	30
	5	14	19	21	29	31	—
	8	—	20	29	40	—	—
Перекрывающиеся цилиндры	2,1	10	28	40	62	—	—
	5,0	—	20	32	36	40	42
	20,0	—	15	20	24	26	26
Шар—плоскость	5,0	10	14	15	16	18	18
	10	13	17	20	22	23	25
	30	16	25	33	37	40	—
Цилиндрический стержень—плоскость	$r_0 = 15,$ $r_3 = 0,5$	20	34	—	40	4	—
	$r_0 = 5,$ $r_3 = 0,5$	15	18	—	18	20	—
Шина—плоскость	$b = 90,$ $r_0 = 0,5,$ $a = 1,0$	14	22	30	42	49	53
	$b = 8,0,$ $r_0 = 0,5,$ $a = 4,0$	14	17	22	30	32	34

Нанесение на электрод диэлектрического покрытия увеличивает начальное напряжение (рис. 3.1), что обусловлено следующим:

покрытие увеличивает чистоту поверхности электрода, заливая его микронеровности;

за счет покрытия увеличивается диаметр электрода, что способствует выравниванию электрического поля;

покрытие создает дополнительное емкостное сопротивление, за счет которого происходит падение напряжения.

Начальное напряжение комбинированного промежутка можно определить из выражения  $U_0 = E_0 k_{nl} + \Delta U_d$ , где  $E_0$  — начальная напряженность, определенная с учетом внешних размеров покрытия и промежутка  $l$  для электродов цилиндр — плоскость



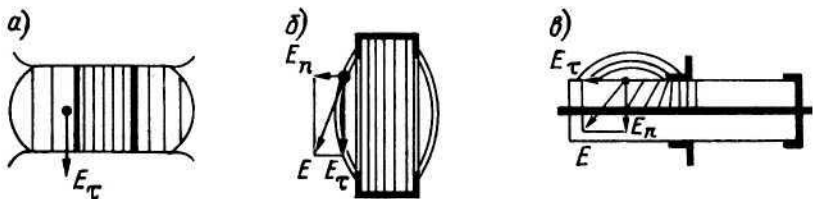


Рис. 3.2. Касательная (а), преобладающая касательная (б) и преобладающая нормальная (в) составляющие напряженности электрического поля типовых конструкций изоляторов

скость;  $k_n$  — коэффициент неравномерности электрического поля;  $l$  — расстояние между покрытием и плоскостью;  $\Delta U_d = (E_n r_0 / \epsilon_d) \ln(r_{ц}/r_0)$  — падение напряжения в емкости диэлектрического покрытия;  $\epsilon_d$  — диэлектрическая проницаемость покрытия;  $r_0$  и  $r_{ц}$  — радиусы покрытия и цилиндра, мм.

Поверхностные пробоя вдоль изоляции могут происходить при испытаниях внешней изоляции высоковольтной конструкции или при перенапряжениях во время эксплуатации.

Испытания изделия производят повышенным напряжением того вида, при котором работает изоляция.

Механизм поверхностного пробоя определяется коэффициентом неравномерности электрического поля, состоянием поверхности диэлектрика, способом сопряжения диэлектрика с электродами, давлением и температурой окружающей среды, а также видом приложенного напряжения. Отмечается, что напряженность импульса  $E_{пр}$  обратно пропорциональна площади поверхности диэлектрика и корню квадратному из длины межэлектродного промежутка, повышается при уменьшении продолжительности импульсов приложенного напряжения и монотонно снижается в интервале температур от  $-40$  до  $+80^\circ \text{C}$ .

Напряжение поверхностного пробоя не зависит от давления в пределах от  $0,65$  до  $1,3 \cdot 10^{-3}$  Па и от материала электродов, но существенно зависит от их угла по отношению к поверхности диэлектрика, достигая максимального значения при угле  $30 \dots 50^\circ$ .

Как видно из сказанного, результаты проведенных в последние годы исследований практически не отличаются от уже известных данных.

Механизм поверхностного пробоя в основном определяется закономерностями, характерными и для пробоя воздуха. Процесс протекает по-разному в однородных и неоднородных полях.

Однородное электрическое поле характеризуется наличием только касательной составляющей. Экспериментальным путем такое поле можно обеспечить на поверхности образцов цилиндрической формы между электродами Роговского. Диаметр электродов превышает более чем в 5 раз диаметр образца (рис. 3.2, а). На рис. 3.2, б и в приведены изоляторы с неоднородными полями.

родными электрическими полями, но на рис. 3.2, б преобладающее место занимает тангенциальная (касательная), а на рис. 3.2, в — нормальная составляющая напряженности электрического поля.

Для рис. 3.2, а поверхность электрода и зона тройного сопряжения имеют повышенные зоны напряженности электрического поля. Пробой, как правило, происходит по поверхности изолятора.

Стримерные каналы в изоляторе, приведенном на рис. 3.2, в, имеют значительно большую емкость  $C$  по отношению к емкости противоположного длинного электрода. Протекающие токи утечки разогревают канал, и вблизи короткого электрода выделяется значительное количество теплоты, диэлектрик разогревается и разрушается. Разрядное напряжение конструкций с преобладающей нормальной составляющей напряженности поля объясняется удельной емкостью  $S$  поверхности изолятора, по которой развивается разряд к противоположному электроду, и может быть выражено зависимостью  $U_n = k_1 / C_1^{0,45}$ , где  $k_1$  — постоянная;  $C_1$  — емкость единицы поверхности изолятора, по которой развивается разряд в направлении другого электрода.

Для плоских образцов  $U_n = k_2 (d/\epsilon)^{0,45}$ , где  $d$  — толщина диэлектрика;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость;  $k_2$  — постоянная.

На рис. 3.3 видно, что с повышением толщины диэлектрика, т. е. с уменьшением удельной поверхностной емкости, разрядное напряжение повышается. С повышением частоты разрядное напряжение снижается. Например с переходом от 50 к 400 Гц оно снижается на 10... 15%.

Поверхностные пробои могут возникнуть, когда оба электрода открыты (табл. 3.2, пп. 3 и 4) или когда один или оба электрода расположены внутри диэлектрика (пп. 1, 2, 4... 6). В последних вариантах разряд называется безэлектродным или емкостным.

При наличии одного открытого электрода свечение возникает на его краю (пп. 1 и 6), а при достаточно тонком слое диэлектрика — на поверхности (пп. 2 и 5). При начальном напряжении  $U_0$  по периметру диэлектрика вокруг цилиндрического электрода возникает слабое свечение, яркость которого по мере увеличения напряжения возрастает.

При большой толщине покрытия (2 мм и более) напряжение увеличивается и помимо свечения одновременно возникают отдельные скользящие разряды.

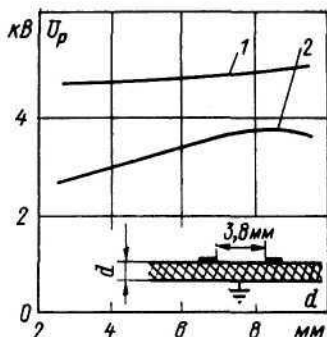
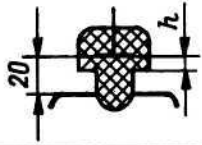
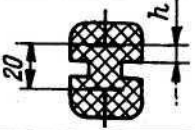
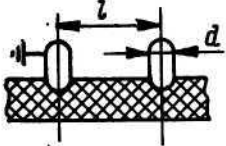
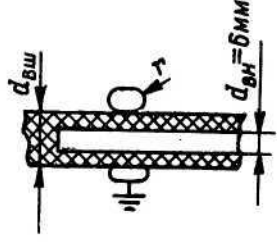
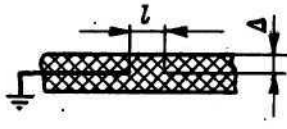
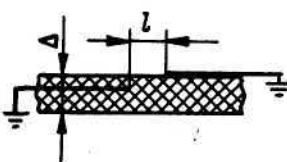


Рис. 3.3. Зависимость напряжения поверхностного пробоя от толщины керамического образца

1 — постоянное напряжение; 2 — напряжение частотой 50 Гц

Таблица 3.2

Вид электродов	Размеры, мм	Напряжение, кВ, возникновения ПЧР		
		постоянное	частотой 50 Гц	частотой 400 Гц
	$h = 2$ $h = 3$	33 >80	15 18	—
	$h = 2$ $h = 3$	— >76	24,4 24,8	15,7 17,7
	$l = 30$ : $d = 2$ $d = 5$ $d = 10$ $d = 20$	—	—	19,5 32,0 33,5 20,2
	$l = 100$ : $d = 2$ $d = 5$ $d = 10$ $d = 20$	— 48,6 —	—	25,0 36,0 39,0 50,0
	$d_{вн} = 10$ : $r = 1$ $r = 2$ $r = 6$	—	—	5,5 6,2 7,0
	$d_{вн} = 16$ : $r = 1$ $r = 2$ $r = 6$	45,0 58,5 52,4	—	10,0 10,2 13,0
	$\Delta = 0,5$ : $l = 2$ $l = 10$	— — >80	12,0 25,0	16,4 23,4
	$\Delta = 1,5$ : $l = 10$	—	25,0	17,9
	$\Delta = 5$ : $l = 5$ $l = 30$	— —	34,4 43,0	— —
	$\Delta = 2$ : $l = 5$ $l = 30$	— 50,7	23,4 39,0	— —

При двух симметрично утопленных электродах (табл. 3.2, п. 2) начальное напряжение выше, чем в промежутке (п. 1). Связано это, видимо, с тем, что в образцах, изображенных в табл. 3.2, п. 1, между опорными точками поверхностного разряда емкостное сопротивление больше, чем в образцах п. 2.

Исследование картины электрического поля показало также большое значение напряженности  $E_{\max}$  в образцах п. 1 по сравнению с напряженностью в образцах п. 2 при одинаковых напряжениях.

При внешних электродах опорных изоляторов напряжение поверхностного пробоя будет меньше, чем напряжение у аналогичных по размерам и форме изоляторов с внутренними электродами. Это помимо сказанного выше связано также с большей долей нормальной составляющей напряженности электрического поля и скоплением вблизи электродов частиц пыли и влаги.

Образованию максимальных напряженностей электрического поля будут способствовать участки загрязнения, неровности на поверхности диэлектрика и электродов, увлажнение и т. п. неоднородности.

Иллюстрацией влияния локальных повышений напряженности поля на разрядные характеристики может служить зависимость напряжения начала коронирования от чистоты обработки поверхности электродов. При обработке полированной поверхности шаровых электродов диаметром 10...15 мм наждачной шкуркой № 3 начальное напряжение коронирования понижается на 30%. Эффект шероховатости перестает сказываться на процессе поверхностного пробоя при чистоте обработки 3.2.

При эксплуатации в загрязненных (запыленных) помещениях и размещенных на морском побережье с возможным проникновением в помещение морского воздуха и тумана характеристики поверхностного разряда подвергаются изменениям.

Наличие сухой равномерно распределенной вдоль поверхности твердых диэлектриков грязи не изменяет начальные и разрядные напряжения по сравнению с чистыми поверхностями.

Увеличение влажности воздуха до 80% начинает практически сказываться только после трех часов воздействия, когда происходит снижение разрядных напряжений до 10%.

Увлажнение загрязненной поверхности или воздействие солевого тумана существенно снижает начальные и разрядные напряжения. При этом поверхностные пробои вызывают разрушение таких невлаготовстойких материалов, как гетинакс и стеклотекстолит.

Так, для промежутка 100 мм между цилиндрическими электродами диаметром 10 мм у эпоксидного компаунда по чистой поверхности или покрытой сухим загрязнением  $U_n = 48,22$  кВ, для слоя загрязнения в атмосфере пресного тумана  $U_n = 18,8$  кВ, а для чистой поверхности в атмосфере соленого ту-

мана  $U_{н} = 17,02$  кВ. Таким образом, результаты испытания изоляции в условиях морского тумана можно считать соответствующими разрядным характеристикам загрязненных образцов.

Сравнительные характеристики разрядных напряжений между цилиндрическими электродами вдоль эпоксидной поверхности в нормальных условиях и при соленом тумане приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Диаметр электрода, мм	2	5	10	20
Межеlectродный промежуток, мм	30	80	100	100
Разрядное напряжение, кВ, в условиях:				
нормальных	19,85	19,14	45,2	54,6
соленого тумана	4,45	3,2	8,5	17,0

Для коаксиальных электродов (табл. 3.2, п. 4) с наружным диаметром эпоксидной изоляции  $d_{вн} = 16$  мм, с внутренним диаметром электрода  $d_{вн} = 6$  мм и расстоянием от края внешнего электрода  $l = 150$  мм разрядное напряжение в нормальных условиях составляло 52,9 кВ, а при соленом тумане — 17,02 кВ, т. е. в три раза ниже.

Как следует из приведенных данных, соленый туман снижает разрядные напряжения в 3...6 раз по сравнению с напряжением в нормальных условиях, а разрядные градиенты в среднем составляют 0,14...0,28 МВ/м.

При переходе к частотам 1...2 кГц в нормальных условиях напряжение поверхностного пробоя мало отличается от значения  $U_{пер}$  для частоты 50 Гц. Однако резко возрастает влияние на напряжение поверхностного пробоя наличие пыли и неровностей на поверхности электродов и диэлектрика, а также увлажненных участков. Вследствие этого частичные и скользящие разряды возникают при более низких напряжениях, а треки образуются значительно быстрее, чем при промышленной частоте.

Поверхностный пробой при постоянном напряжении происходит при значениях, в 1,5 раза больших, чем на переменном. Неровности и загрязнение диэлектрика отражаются на напряжении поверхностного пробоя в меньшей степени, чем наличие на поверхности диэлектрика влаги.

Пульсирующее напряжение характерно для высоковольтных выпрямителей и для оборудования, питающегося от них. Изменение пульсирующего напряжения поверхностного пробоя по сравнению с постоянным и при повышенной частоте можно определить, воспользовавшись данными, приведенными в табл. 3.4 ( $l = 100$  мм).

Пульсирующее напряжение рассматривается с учетом коэффициента пульсации  $k_{п}$ .

На основании табличных данных можно сделать следующие выводы:

Таблица 3.4

Диаметр шпиглек, $\times 10^{-3}$ м	Кoeffи- циент неравно- мерности $k_n$	Значение напряжения, кВ				
		постоянное	пульсирующее			частотой 400 Гц
			50 Гц, $k_n=100\%$	400 Гц, $k_n=60\%$	400 Гц, $k_n=103\%$	
2	2,5	—	27,2	40,0	40,4	32
5	2,4	48,6	38,2	47,4	50,4	46
10	2,3	—	46,0	57,2	52,6	50
20	1,7	—	64,0	67,0	60,0	64

1) напряжение поверхностного пробоя в слабо неравномерных полях зависит от формы электрического поля;

2) значение коэффициента пульсации  $k_n$  незначительно отражается на напряжении поверхностного пробоя.

Исследования импульсного напряжения пробоя вдоль поверхности эпоксидного компаунда, щелочного стекла, фторопласта-4, фарфора, полиметилметилметакрилата и гетинакса производились в резко неравномерных электрических полях с преобладающей нормальной составляющей напряженности поля в системе электродов стержень—плоскость, кольцо—цилиндр и стержень—цилиндр при воздействии импульса косоугольной и прямоугольной формы с временем разряда от  $6 \cdot 10^{-7}$  с до  $5 \cdot 10^{-3}$  с [17].

Выявлено, что последовательность стадий разряда при поверхностном пробое твердых диэлектриков подобна пробое воздушных промежутков и состоит из стадий короны и лидерной, финального скачка, главной и дуговой стадий.

Существенное влияние на параметры поверхностного разряда оказывают толщина и диэлектрическая проницаемость материала, которые, в основном, определяют пробивное напряжение:

1) поверхностные свойства диэлектрика, так же как и значения удельных поверхностных и объемных сопротивлений, не оказывают существенного влияния на напряжение поверхностного пробоя;

2) с увеличением крутизны импульса приложенного напряжения от 4 до 600 кВ/мкс напряжение начала скользящего разряда изменяется по закону  $U_{с.к} = kA^n$ , где коэффициенты  $k$  и  $n$  также зависят от толщины и диэлектрической проницаемости материала;

3) напряжение поверхностного пробоя при воздействии однопериодного напряжения положительной полярности значительно выше, чем при  $f = 50$  Гц;

4) напряжение поверхностного пробоя при воздействиях приложенного напряжения в течение  $2,5 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-4}$  с может быть в 2...3 раза меньше, чем при постоянном напряжении;



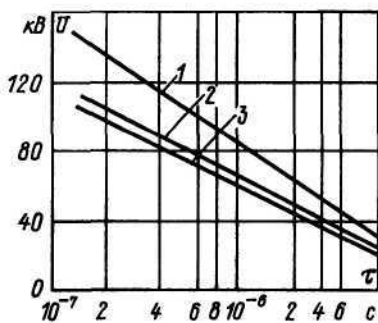


Рис. 3.4. Зависимость напряжения пробоя в воздухе и пробоя вдоль поверхности между электродами стержень—стержень от длительности импульса

1 — в воздухе; 2 — вдоль поверхности компаунда ЭПК-4 с наполнителем; 3 — вдоль поверхности компаунда ЭПК-4 без наполнителя

Исследовался также пробой вдоль поверхности эпоксидного компаунда марки ЭЗК-4 на импульсах длительностью от  $1 \cdot 10^{-7}$  до  $2 \cdot 10^{-5}$  с при электродах стержень—стержень, концы которых плотно прилегали к плоскости поверхности пробоя.

Как и следовало ожидать, испытания показали, что напряжение пробоя вдоль поверхности меньше значения пробоя воздушного промежутка (рис. 3.4). Разность напряжения поверхностного пробоя возрастает с уменьшением длительности импульса.

Из сравнения кривых на рис. 3.4 можно сделать вывод о положительном влиянии наполнителя на увеличение напряжения поверхностного пробоя особенно в области малых значений длительности импульса.

### 3.2. ПРОБОЙ В ВОЗДУХЕ И ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ

Отсутствие частичных разрядов (ЧР, ПЧР), а также пробоев в воздухе и вдоль поверхности на высокой частоте, по сравнению с их отсутствием на промышленной частоте, является более важным для изоляционных конструкций. Возникновение ЧР приводит к образованию радиопомех, а также к перерастанию ЧР в крайне опасную для аппаратуры факельную форму разряда.

Напряжение образования ПЧР в удобной для аналитического определения форме можно вычислить по формуле

$$U_0 = 2,45\delta l/k_n [1 + c/(\delta r_0)^{0,38}],$$

5) напряжение поверхностного пробоя слабо зависит от длины разрядного промежутка;

6) с увеличением толщины или с уменьшением диэлектрической проницаемости материала напряжение поверхностного пробоя возрастает по логарифмическому закону;

7) при положительной полярности стержневого электрода напряжение поверхностного пробоя выше, чем при отрицательной, и слабо зависит от крутизны импульса приложенного напряжения;

8) напряжение поверхностного пробоя для исследованных систем электродов практически не зависит от геометрии разрядного промежутка.

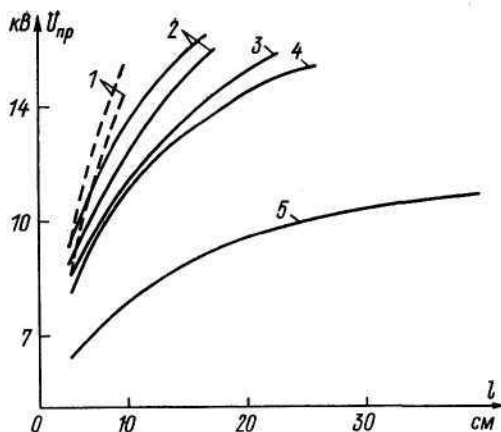


Рис. 3.5. Зависимость напряжения пробоя от расстояния между электродами шар—плоскость (кривые 1...3) и гиперboloид—плоскость (кривые 4 и 5) на частоте 50 и 1000 кГц

1 —  $r=1,4$  мм; 2 —  $r=3$  мм; 3 —  $r=5,5$  мм; 4 —  $r=2$  мм; 5 —  $r=10$  мм

где  $l$  — расстояние между электродами;  $r_0$  — наименьший радиус кривизны электродов;  $k_n$  — коэффициент неравномерности электрического поля;  $c$  — коэффициент, зависящий от формы импульса напряжения и коэффициента неравномерности электрического поля;  $\delta$  — относительная плотность воздуха.

Необходимость исследования пробоя в воздухе на высоких частотах, помимо общеизвестных причин, возникает для конструкций с твердой изоляцией в случае применения некороностойких полимерных материалов (ПЭ, ПП, Ф-4 и др.) с целью создания системы изоляции, гарантирующей отсутствие пробоя вдоль поверхности тела изолятора.

С повышением частоты наблюдается снижение разрядных напряжений по сравнению с постоянным напряжением и напряжениями промышленной частоты.

Из рис. 3.5 виден характер изменения напряжения с ростом межэлектродного расстояния и изменением радиусов кривизны электродов.

Зависимость напряжения пробоя от частоты для указанных электродов четко выявляется только у кривых 1 и 2, где напряжение на частоте 50 кГц примерно на 6% больше, чем на частоте 1000 кГц. На других разрядных промежутках различие составляет 1...2% и четко фиксироваться не может. Это снижение связано с накоплением объемного заряда положительных ионов в разрядном промежутке, который искажает электрическое поле и увеличивает его в активной области около катода.

Работами группы А. А. Жукова [18] найдено, что образование на высоких частотах токов отрицательных и положительных ионов при низких значениях напряжения свидетельствует о на-

чале формирования объемного заряда до значений предпробойных напряжений и только перед пробоем начинается его быстрый рост. При этом в слабо неравномерных полях напряжение пробоя в исследованном диапазоне частот 0,05...5 МГц зависит от частоты, а при резконевномерном поле такой зависимости не наблюдается.

Накопление объемного заряда становится возможным, когда амплитуда дрейфовых колебаний ионов в переменном электрическом поле с повышением частоты становится меньше размера разрядного промежутка. Частота, при которой начинается снижение напряжения, называется первой критической частотой. Значение критической частоты для изоляционных конструкций зависит от коэффициента неравномерности электрического поля, характерного размера длины промежутка, от рода и давления газа. С дальнейшим повышением частоты снижение разрядного напряжения замедляется. Новое резкое снижение разрядного напряжения с повышением частоты наблюдается, когда амплитуда дрейфовых колебаний электронов становится меньше характерного размера разрядного промежутка. Соответствующая частота называется второй критической частотой. Ее возникновение обычно обнаруживается в диапазоне частот, соответствующем мегагерцам.

Описанная зависимость разрядных напряжений от частоты четко наблюдается в промежутках с коэффициентом неравномерности  $k_n < 3 \dots 4$ . Характерным размером разрядного промежутка в этом случае считают длину промежутка.

При  $k_n > 4$  амплитуда колебаний ионов и электронов может оказаться меньше длины промежутка еще задолго до достижения частотой значения первой критической. Характерным размером промежутка считают здесь протяженность активной зоны, т. е. зоны, где эффективный коэффициент ионизации электронным ударом  $\alpha_{эф} > 0$ .

Таблица 3.5

Частота, кГц	Значение разрядных напряжений, кВ, при различных типах промежутков			
	цилиндр—цилиндр ( $r_0=10$ мм; $k_n=1,41$ )	конус—конус ( $r_0=12$ мм; $k_n=1,74$ )	конус—плоскость ( $r_0=12$ мм; $k_n=2,38$ )	провод—плоскость ( $r_0=5$ мм; $k_n=2,62$ )
150	50	45	36	35
1500	47	40	30	26
$U_{150}/U_{1500}$	1,07	1,12	1,2	1,35

В табл. 3.5 приведены значения разрядных напряжений при постоянном расстоянии 30 мм в нормальных условиях. Данные таблицы свидетельствуют о снижении напряжения с ростом частоты на 7...35% по мере увеличения коэффициента неравномерности электрического поля.

Для практических целей можно воспользоваться значениями разрядных напряжений в нормальных условиях для коэффициента неравномерности электрического поля  $k_n < 4$  при частотах 150 кГц (в числителе) и 1500 кГц (в знаменателе), приведенных в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Тип промежутка	Значение разрядных напряжений, кВ, при расстоянии между электродами, мм, равном			
	100	200	300	400
Цилиндр—цилиндр ( $r_0 = 10 \dots 35$ мм)	18/—	36/34	50/47	61/57
Цилиндр—плоскость ( $r_0 = 5$ мм)	19/12	28/21	35/26	41/29
Конус—конус ( $r_0 = 12$ мм)	—/18	36/32	45/40	53/45
Конус—плоскость ( $r_0 = 12$ мм)	—/18	31/25	37/30	40/36
Стержень—стержень ( $r_0 = 5$ мм)	18/16	23/21	24/23	27/25
Стержень—плоскость ( $r_0 = 5$ мм)	14,2/19,2	20/13	20,5/14,2	21/15

Для слабо неравномерных электрических полей имеет место монотонное уменьшение разрядного напряжения с ростом частоты.

Таблица 3.7

Вид промежутка	Коэффициент неравномерности $k_n$	Напряженность, МВ/м
Шар—шар, шар—плоскость	$0,25 \left[ \frac{l}{r} + 2 \times \sqrt{\left( \frac{l}{r} + 1 \right)^2 + 8} \right]$	$2,45\delta [1 + 0,78/(\delta r)^{0,38}]$
Цилиндр—плоскость, параллельные и перекрещенные цилиндры	$\frac{\sqrt{(2rl + l^2)/r^2}}{\ln \left( \frac{r+l}{r} + \sqrt{\frac{2rl + l^2}{r^2}} \right)}$	$2,45\delta [1 + 0,65/(\delta r)^{0,38}]$
Гиперболоид—гиперболоид, гиперболоид—плоскость, конус—конус ( $\rho = 12$ )	$\frac{\sqrt{1+\rho}}{\rho \operatorname{arth} [1/(1+\rho)]}$	$2,45\delta [1 + 0,728/(\delta r)^{0,38}]$
Коаксиальные цилиндры	$(R/r - 1)/\ln(R/r)$	$2,45\delta [1 + 0,65/(\delta r)^{0,38}]$

Коэффициенты неравномерности электрического поля и напряженности образования ЧР можно определить из уравнений, приведенных в табл. 3.7, где  $l$  — расстояние между электродами;

$r$  — радиус кривизны;  $\rho = r/l$ ;  $\delta$  — относительная плотность воздуха.

Для экспериментальных данных разрядных напряжений между электродами шар—шар, шар—плоскость, гиперболоид вращения — гиперболоид вращения, гиперболоид вращения — плоскость и для коаксиальных систем были определены с использованием программы AXIAL значения максимальных напряжений, которые сравнивались со значениями, определенными по Бенингу [19] для частот до 20 МГц.

Таблица 3.8

Разрядные характеристики для электродов шар — шар  
(амплитудные значения)

$f$ , Гц	$l$ , мм	$U_{пр}$ , кВ (эксперимент)	$E_{max}$ , МВ/м	$E_{ср}$ , МВ/м	$k_n = \frac{E_{max}}{E_{ср}}$	$E_{max}$ , МВ/м (по Бен- нингу)	$E_{max}$ , МВ/м (по Пикку)
50	5	15,5	3,7	3,1	1,2	3,7	3,6
	10	30,0	4,6	3,0	1,5	4,6	4,1
	15	41,0	5,2	2,7	1,9	5,2	4,3
	20	49,0	5,7	2,4	2,3	5,7	4,4
$5,2 \cdot 10^6$	5	14,0	3,4	2,8	1,2	3,3	3,3
	10	24,8	3,4	2,5	1,4	3,8	3,6
	15	33,8	3,3	2,3	1,9	4,3	3,6
	20	39,5	4,6	2,0	2,3	4,6	3,5
$9 \cdot 10^6$	5	12,2	2,9	2,4	1,2	2,9	2,9
	10	22,0	3,0	2,2	1,4	3,3	3,0
	15	30,0	3,8	2,0	1,9	3,8	3,2
	20	37,5	4,4	1,9	2,3	4,4	3,3
$15 \cdot 10^6$	5	11,5	2,8	2,3	1,2	2,8	2,7
	10	22,5	3,1	2,2	1,4	3,4	3,1
	15	28,0	3,6	1,9	1,9	3,6	2,9
	20	38,0	4,4	1,9	2,3	4,4	3,4
$20 \cdot 10^6$	5	13,5	3,2	2,7	1,2	3,2	3,2
	10	20,5	2,8	2,1	1,4	2,8	2,8
	15	28,0	3,6	1,9	1,9	3,6	2,9
	20	34,0	4,0	1,7	2,3	4,0	3,0

Характеристики, приведенные в табл. 3.8... 3.10, могут быть использованы для приближенных расчетов значений  $k_n$  и  $l$  конструкций с близкими геометриями.

Рассчитанные по табл. 3.7 значения  $k_n$  для межэлектродных расстояний 5...20 мм соответственно равны 1,18; 1,37; 1,57; 1,78.

Анализируя экспериментальные значения пробоя воздушных промежутков шар—шар радиусом 10 мм (табл. 3.8), можно наблюдать, что при одинаковой форме электродов с ростом изо-

Таблица 3.9

Разрядные характеристики для электродов шар — плоскость при  $r_0 = 10$  мм  
(амплитудные значения)

$f$ , Гц	$l$ , мм	$U_{пр}$ , кВ	$E_{max}$ , МВ/м	$E_{ср}$ , МВ/м	$k_H = E_{max}/E_{ср}$	$E_{max}$ , МВ/м (по Бенингу)
50	5	16,2	4,4	3,2	1,4	4,4
	10	26,2	4,8	2,7	1,8	4,7
	15	36,2	5,3	2,4	2,2	5,3
	20	47,0	6,3	2,45	2,7	6,3
$5,2 \cdot 10^6$	10	19,0	3,4	1,9	1,8	3,4
	15	27,0	4,0	1,8	2,2	4,0
	20	37,0	4,9	1,9	2,7	4,9
	25	42,0	5,3	1,7	3,1	5,3
$9 \cdot 10^6$	10	19,0	3,4	1,9	1,8	3,4
	15	24,0	3,5	1,6	2,2	3,5
	20	32,0	4,3	1,6	2,7	4,3
	25	38,5	4,8	1,5	3,1	4,8
$15 \cdot 10^6$	10	20,5	3,4	2,0	1,8	3,6
	15	26,5	3,9	1,8	2,2	3,9
	20	31,6	4,4	1,6	2,7	4,1
	25	37,0	4,6	1,5	3,1	4,7

ляционного промежутка, помимо известного снижения  $E_{ср}$ , существенно возрастает значение  $E_{max}$ .

Значения величин  $E_{max}$ , рассчитанных по Бенингу и по Пику, имеют значительные расхождения. Разница значений увеличивается с ростом расстояния между электродами, что характерно и для электродов шар — плоскость (табл. 3.9).

Таблица 3.10

Разрядные характеристики для электродов шар — плоскость  
при  $r_0 = 3$  мм и  $f = 5 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^6$  Гц (амплитудные значения)

$l$ , мм	$U_{пр}$ , кВ	$E_{max}$ , МВ/м	$E_{ср}$ , МВ/м	$k_H$	$E_{max}$ , МВ/м (по Бенингу)
5	11,5	5,4	2,3	2,0	5,4
10	15,7	6,2	1,6	3,3	6,1
15	17,8	6,6	1,2	5,3	6,6
20	19,4	7,0	1,0	7,2	—
25	20,2	7,2	0,8	8,9	—

Величины  $E_{max}$ , определенные по программе AXIAL и по Бенингу, практически не различаются и могут быть использованы для определения изоляционных промежутков и выбора геометрии электродов.



Сравнение табл. 3.8 и 3.9 показывает, что при одинаковых радиусах кривизны шаров и расстояниях между электродами большие значения напряжений пробоя имеют место для электродов шар—шар, что, очевидно, вызвано более равномерным электрическим полем ( $k_n \rightarrow 1$ ) и, следовательно, более равномерным распределением заряда вдоль поверхности электрода. Из сравнения также видно, что при расстояниях более 15 мм большие значения  $E_{\max}$  не свидетельствуют о большем значении напряжения пробоя. Поэтому предварительный выбор формы и размеров изоляционных промежутков целесообразно производить не по значению  $E_{\max}$ , а по  $k_n$ . Значения  $E_{\max}$  не являются абсолютным критерием для выбора системы изоляции, в то время как уменьшение  $k_n$  всегда обеспечивает существенные преимущества по сравнению с неравномерными полями.

Для электродов шар—плоскость радиусом 3 мм (табл. 3.10) напряжения пробоя для диапазона частот  $5 \cdot 10^3 \dots 10^6$  Гц близки по своим значениям.

Значения  $E_{\max}$  в 1,5 раза выше, чем напряженность для электродов типа шара радиусом 10 мм, но напряженность пробоя меньше в  $1,5 \dots 2$  раза. Следовательно, при равных межэлектродных промежутках значения  $k_n$  для шара радиусом 3 мм почти в 2 раза превосходят  $k_n$  для шара радиусом 10 мм. Это является дополнительным свидетельством универсальности выбора геометрии поля с учетом коэффициента  $k_n$ .

Разрядные характеристики (амплитудные значения) для различных расстояний между гиперboloидами вращения и  $r_0 = 10$  мм приведены в табл. 3.11.

Для электродов гиперboloид вращения — плоскость и гиперboloид — гиперboloид (табл. 3.11) с радиусами кривизны 10 мм

Таблица 3.11

$l$ , мм	$k_n$	$U_{\text{пр}}$	$E_{\max}$	$E_{\text{ср}}$	$U_{\text{пр}}$	$E_{\max}$	$E_{\text{ср}}$	$U_{\text{пр}}$	$E_{\max}$	$E_{\text{ср}}$
		кВ	МВ/м	МВ/м	кВ	МВ/м	МВ/м	кВ	МВ/м	МВ/м
		50 Гц			10·10 <sup>6</sup> МГц			20·10 <sup>6</sup> МГц		
Гиперboloид вращения — гиперboloид вращения										
15	2,29	45,5	3,2	3,0	33,2	2,4	2,2	27,5	1,9	1,8
20	2,43	52,3	2,8	2,6	42,0	2,3	2,1	36,2	2,0	1,8
25	2,50	57,5	2,5	2,3	47,5	2,1	1,9	47,2	2,1	1,9
30	2,71	62,0	2,3	2,1	49,0	1,8	1,6	55,0	2,1	1,8
35	2,84	65,0	2,1	1,9	—	—	—	—	—	—
Гиперboloид вращения — плоскость										
10	1,37	26,0	2,78	2,60	17,5	1,9	1,8	—	—	—
15	1,57	35,0	2,54	2,33	22,5	1,6	1,5	—	—	—
20	1,78	41,2	2,31	2,06	27,5	1,5	1,4	—	—	—
25	1,96	47,5	2,19	1,91	32,5	1,5	1,3	—	—	—
30	2,17	55,0	2,15	1,83	36,25	1,4	1,2	—	—	—

Таблица 3.12

$r_0$ , мм	$l$ , мм	$U_{пр'}$ , кВ	$U_{пр'}$ , кВ	$E_{max'}$ , МВ/м	$E_{ср'}$ , МВ/м	$k_H$	$U_{пр'}$ , кВ	$E_{max'}$ , МВ/м	$E_{ср'}$ , МВ/м	$k_H$	$U_{пр'}$ , кВ	$E_{max'}$ , МВ/м	$E_{ср'}$ , МВ/м	$k_H$
			3,33 МГц				10 МГц				20 МГц			
0,4	19,7	10,8	10,2	7,2	0,5	13,8	9,2	7,0	0,5	13,8	8,1	5,7	0,41	14,54
0,9	19,1	16,9	15,1	5,4	0,8	6,9	13,7	4,9	0,7	6,8	12,6	4,6	0,67	6,8
1,5	18,5	20,7	18,8	4,9	1,0	4,8	16,8	4,3	0,9	4,7	15,9	4,1	0,86	4,7

Таблица 3.13

$l$ , мм	$U_{пр'}$ , кВ	$E_{max'}$ , МВ/м	$E_{ср'}$ , МВ/м	$k_H$	$U_{пр'}$ , кВ	$E_{max'}$ , МВ/м	$E_{ср'}$ , МВ/м	$k_H$	$U_{пр'}$ , кВ	$E_{max'}$ , МВ/м	$E_{ср'}$ , МВ/м	$k_H$
	$r_0=4$ мм				$r_0=10$ мм				$r_0=25$ мм			
10	24	3,8	2,4	1,6	29	3,8	2,9	1,3	32,0	3,6	3,2	1,1
20	40	4,5	2,0	2,2	42	3,5	2,1	1,6	43,0	2,2	2,1	1,0
30	50	4,7	1,5	3,2	57	3,8	1,9	2,0	63,0	3,1	2,1	1,5
40	57	4,9	1,4	3,4	70	4,0	1,4	2,3	81,0	3,3	2,0	1,6

характерно снижение значений  $E_{\text{ср}}$  и  $E_{\text{max}}$  с увеличением расстояния между электродами и соответственно с ростом  $k_n$ . Более высокие значения  $U_{\text{пр}}$ , а соответственно и  $E_{\text{max}}$ ,  $E_{\text{ср}}$ , при равных радиусах кривизны и расстояниях между электродами имеют место для электродов гиперболоид — гиперболоид.

Исходя из данных, приведенных в табл. 3.8 ... 3.11, следует, что при выборе высокочастотных изоляционных промежутков с электродами равного радиуса кривизны целесообразно применять их в следующем порядке: гиперболоид—гиперболоид, шар—шар, шар—плоскость, гиперболоид—плоскость, которые обеспечивают большую электрическую прочность при прочих равных условиях.

При выборе тех же изоляционных промежутков, исходя из напряжения образования ЧР, преимущества будут снижаться для электродов шар—плоскость, шар—шар, гиперболоид—гиперболоид, гиперболоид — плоскость.

Разрядные характеристики для коаксиальной системы с наружным диаметром 40 мм приведены в табл. 3.12.

Как видно из табл. 3.12, для коаксиальной системы характерны те же зависимости, что и для других элементов — рост напряжения пробоя с уменьшением  $k_n$  и снижение его с повышением частоты.

Разрядные характеристики коаксиальной системы для различных значений внутреннего и внешнего радиусов кривизны на частоте 100 кГц (амплитудные значения) приведены в табл. 3.13.

Данные табл. 3.13 свидетельствуют о том, что с увеличением радиуса внешнего электрода при неизменном значении радиуса кривизны внутреннего, т. е. с ростом межэлектродного расстояния, возрастают напряжение разряда и максимальная напряженность электрического поля. При постоянном расстоянии между электродами и росте радиусов внутреннего и внешнего электродов, т. е. с уменьшением коэффициента неравномерности электрического поля, имеют место увеличение разрядного напряжения и уменьшение значения максимальной напряженности.

Факельный, или одноэлектродный, разряд является разновидностью высокочастотного разряда и возникает при частотах в несколько мегагерц на участках электрода с максимальной напряженностью и максимальными градиентами температурного поля. Ионизация и повышение температуры воздуха в этих участках приводит к появлению столба ионизированного воздуха, который подымается, принимая форму факела. Образовавшийся факел (табл. 3.14) передвигается вместе с движением воздуха, разрушая изоляцию и другие элементы конструкции, так как его температура превышает  $2000^\circ\text{C}$ .

Попадая в область пониженной напряженности электрического поля, факет гаснет.

Наравне с влиянием на факельный разряд температуры ионизированного воздуха, на пороговое напряжение и критиче-

Таблица 3.1

Система электродов	l, мм	k <sub>н</sub>	U <sub>0</sub> ,	E <sub>max</sub> '	E <sub>ср</sub> '	U <sub>0</sub> ,	E <sub>max</sub> '	E <sub>ср</sub> '	U <sub>0</sub> ,	E <sub>max</sub> '	k <sub>н</sub>
			кВ	МВ/м	МВ/м	кВ	МВ/м	МВ/м	кВ	МВ/м	МВ/м
			3,33 МГц			10 МГц			20 МГц		
Шар—плоскость (r=2 мм)	10	5,8	10,8	6,3	1,1	10,0	5,8	1,0	9,4	5,4	0,9
	30	10	13,0	4,5	0,5	11,9	4,0	0,4	11,4	3,8	0,4
	50	10	13,8	2,6	0,3	12,8	2,4	0,2	12,1	2,4	0,2
Шар—плоскость (r=3,12 мм)	10	3,9	13,5	5,3	1,4	12,7	4,9	1,3	12,0	4,7	1,2
	30	10	16,9	5,7	0,6	15,9	5,3	0,5	14,7	4,9	0,5
	50	10	18,0	3,6	0,5	17,1	3,4	0,3	15,7	3,1	0,3
Гиперболоид— плоскость (r=1 мм)	3	2,6	7,7	6,7	2,6	6,7	5,8	2,2	6,2	5,3	2,1
	22	10	12,5	5,7	0,5	11,1	5,0	0,5	10,3	4,7	0,5
Гиперболоид— плоскость (r=5 мм)	3	1,3	7,9	3,4	2,6	6,7	2,9	2,2	6,3	2,7	2,1
	22	3,3	12,5	1,9	0,6	11,6	1,7	0,5	10,7	1,6	0,5
Цилиндр— плоскость (r=2 мм)	5	2,7	17,2	6,7	2,4	11,6	6,4	2,3	10,8	6,1	2,2
	10	2,4	18,8	4,5	1,9	17,3	4,1	1,7	16,1	3,9	1,6
	12	2,5	20,8	4,3	1,7	19,1	4,0	1,6	18,0	3,7	1,5

скую частоту могут влиять теплопроводность проводника, площадь его поверхности охлаждения, климатические факторы (влажность, запыленность).

Создание условий, исключающих создание на изоляционной конструкции факельного разряда, встречает трудности вследствие влияния на его образование случайных факторов, приводящих к возникновению локальных напряженностей или температурных излучений, скоплению пыли или влаги, образованию коротких замыканий или чрезмерных перенапряжений, например, при коммутациях. Наблюдались случаи образования факельного разряда при появлении насекомых на высокочастотных проводах.

Наличие факельного разряда недопустимо из-за опасности перегорания проводов, значительных потерь энергии и снижения формы передаваемого сигнала.

Снижение напряжения пробоя вдоль поверхности изоляции до 20...25% с ростом частоты для конструкций со слабо неравномерным полем наблюдается уже при 10...20 кГц. Более раннее, по сравнению с пробоем воздушных промежутков, достижение первой критической частоты можно объяснить повышением напряженности электрического поля на границе диэлектрика, присутствием макро- и микронеоднородностей на поверхности вследствие недостаточной чистоты обработки поверхности диэлектрика, оседания пыли, влаги и т. п. Уменьшение напряжения поверхностного, по сравнению с воздушным, разряда

обусловлено также ростом емкостных токов и процессом объемной ионизации воздуха с увеличением диэлектрической проницаемости твердой изоляции. Отсюда вытекают особые требования к снижению емкости, предъявляемые к высокочастотным изоляционным конструкциям — снижению площади арматуры, увеличению изоляционного промежутка, снижению диэлектрической проницаемости материала и др.

Проведенные группой А. А. Жукова испытания цилиндрических образцов из миполон, фторопласта-4 и стеатита марки Б-17, помещенных между электродами Роговского в диапазоне 1...5 МГц, показали:

1) по сравнению с аналогичным воздушным промежутком, имеющим пробой при напряжении 9,4 кВ, напряжение пробоя вдоль поверхности миполон составило 8,5 кВ, для Ф-4 — составило 8,75 кВ, а для Б-17 — снизилось до 5 кВ;

2) в отличие от пробоя в воздухе после пробоя вдоль поверхности при отсутствии высокочастотного напряжения наблюдается медленное (до 5 мин) спадание токов положительных и отрицательных ионов.

Предполагается, что причина этих явлений — накапливающийся на поверхности диэлектрика заряд. Поверхностный пробой происходит при наличии переменного высокочастотного поля и постоянной составляющей объемного заряда, не учитываемого измерительной аппаратурой.

## **ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ**

### **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

#### **4.1. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗОЛЯЦИИ**

Следует отличать механическую прочность твердой изоляции, полученную на образцах, не содержащих внутри инородных материалов и изготовленных с минимальными внутренними остаточными механическими напряжениями, от прочности изоляции в высоковольтной изоляционной конструкции, в которой она в значительной мере связана с конструктивно-технологическими факторами.

В процессе изготовления изоляционных конструкций механическая прочность зависит от используемых конструктивных материалов, размеров, формы и местонахождения арматуры, определяющих термоупругие напряжения в изоляции, а влияние технологии определяется рецептурой, режимами переработки, особенностями оборудования и т. п.

В дальнейшем на прочностные свойства оказывают влияние условия хранения, транспортировки и эксплуатации со своими

механическими, тепловыми и электрическими нагрузками.

Предельное состояние изоляции связано либо с разрывом межатомных связей, приводящих к потере прочности (хрупкому разрушению), либо с разрывом межмолекулярных связей, приводящих к потере формы (пластическая или вынужденно-эластическая деформация), либо их комбинации (хрупкоэластическая деформация). Границы работоспособности твердой изоляции определяются энергией межатомных и межмолекулярных связей и степенью ослабления этих связей термофлюктуационными процессами.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные под руководством К. Н. Кана [20], показали, что на значение термоупругих напряжений (ТУН) основное влияние оказывают температура стеклования полимера, ТКЛР, модуль упругости армирующих и изоляционных материалов, а работоспособность изоляции зависит от прочностных характеристик при кратковременном и длительном нагружении. Главным образом, как показала практика, сказывается двухосное растяжение.

Так как механическая работоспособность изоляции находится в функциональной зависимости от всех характеристик, для количественной оценки используется критерий работоспособности.

#### 4.1.1. Эпоксидные компаунды.

На прочностные свойства эпоксидного компаунда в значительной мере влияют рецептурно-технологические факторы, которые способствуют усилению или ослаблению связей, характеристики смолы и отвердителя, характеристики и процентный состав наполнителя и т. п.

Таблица 4.1

Смола	Эпикот-828				Эпикот-11	Эпикот-1040	Аральдит-В	Аральдит
	Отвердитель	Эпикур	Ларомин С360	Изофорон-диамин				
					Эпикур РХЕ-11	Эпикур ЕРА	НТ901	НТ976
Временное сопротивление на растяжение, МПа	90,0	77,0	85,0	80,0	83,0	85,0	< 85	< 80

Примечание. Характеристики смолы Эпикот приведены по данным фирмы «Шелл», смолы Аральдит — фирмы «Циба».

В табл. 4.1 приведены временные сопротивления на растяжение при кратковременном воздействии нагрузки для некоторых типов смол в зависимости от марки отвердителя. Рецептура и технологический процесс выбраны оптимальными.



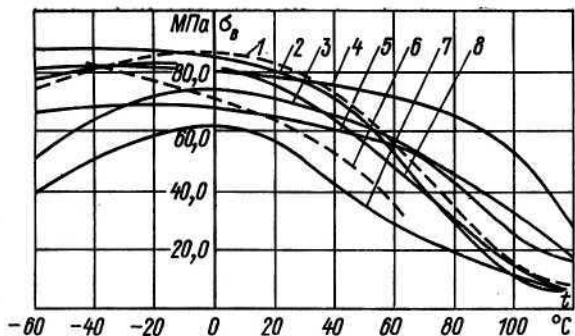


Рис. 4.1. Зависимость временного сопротивления на растяжение различных марок компаундов от температуры  
 1 — ЭЗК-1; 2 — ЭЗК-31 с наполнителем МА; 3 — ЭЗК-10 с МТГФА; 4 — ЭЗК-20; 5 — ЭЗК-10 с МА; 6 — ЭЗК-5; 7 — ЭЗК-31 с МТГФА; 8 — ЭЛП-120

Компаунды на основе смол циклоалифатического ряда вследствие сравнительно низких значений временного сопротивления на растяжение ( $\sigma_b = 36,6 \dots 51,8$  МПа) в данной главе не рассматриваются.

Из данных, приведенных в табл. 4.1, видно, что для смолы типа Эликот-828 прочность в зависимости от типа отвердителя может изменяться более чем на 15%.

Температурный ход кривых временного сопротивления на растяжение (рис. 4.1) также свидетельствует о влиянии типа отвердителя на прочность.

Переход от метилтетрагидрофталевого ангидрида к малеиновому позволяет значительно повысить временное сопротивление компаунда ЭЗК-31, особенно в области отрицательных температур (кривые 2 и 7 рис. 4.1).

Влияние типа отвердителя на значения  $\sigma_b$  связано с изменением плотности шивки, т. е. с изменением расстояния между реакционноспособными участками и с изменением подвижной шитой молекулы.

Разрушения компаунда без наполнителя (смола + отвердитель) и с наполнителем имеют различный характер: большая однородность структуры ненаполненного компаунда способствует возникновению разрушений, обусловленных в первую очередь, термофлюктуационными процессами, описываемыми температурно-временной зависимостью прочности. Для наполненных компаундов, вследствие большей неоднородности структуры, более характерно влияние механизма разрушения, связанного с локальными напряжениями, с образованием микротрещин и местных повреждений материала. При неравномерном распределении пылевидного кварцевого песка (ПКП) по всему объему эпоксидной изоляции, так же как и других наполнителей в полимерах, такой механизм становится преобладающим.

В наполненном компаунде одновременно имеют место и некоторые явления, которые препятствуют образованию генеральной трещины.

На рис. 4.2 приведена зависимость временного сопротивления на растяжение от количества наполнителя.

Минимальная прочность соответствует составу, содержащему массовую долю ПКП, равную 175%. Можно предполагать, что такое соотношение жидкой и твердой фракции в большей мере способствует возникновению неоднородностей структуры, например из-за оседания ПКП.

Возможно влияние и других факторов, относящихся к механизму сцепления с наполнителем.

Применение в качестве наполнителя кварцевого песка типа КП-1 повышает почти в 2 раза временное сопротивление на растяжение компаунда по сравнению с песком КП-3.

Отжиг (термообработка при 700...800°С) песка КП-1 повышает временное сопротивление на 5%, КП-3 — на 10%.

Отмечается также положительное влияние пылевидной фракции песка на повышение механической прочности компаунда.

Действие температуры на прочностные свойства компаундов с различным наполнением сказывается особенно отрицательно при массовой доле ПКП, равной 100...150% (рис. 4.3). С увеличением объемного заполнения большие значения временного сопротивления на растяжение сдвигаются в область более низких температур. Максимальное временное сопротивление на

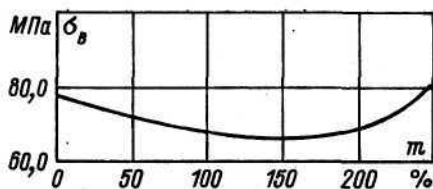


Рис. 4.2. Зависимость временного сопротивления на растяжение  $\sigma_b$  компаунда марки ЭЗК-31 от массы  $m$  ПКП (при  $t = 20^\circ\text{C}$ )

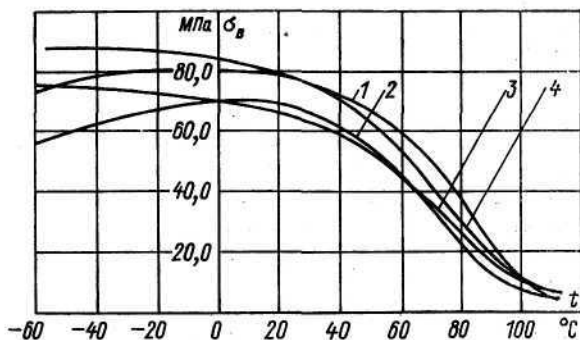


Рис. 4.3. Зависимость временного сопротивления на растяжение компаунда марки ЭЗК-31 от температуры при различной массовой доле ПКП

1 — без наполнителя; 2 — 100%; 3 — 150%; 4 — 250%

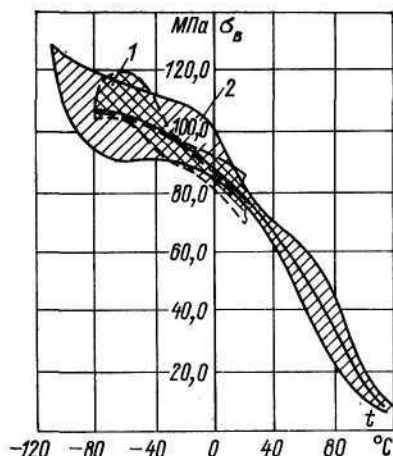


Рис. 4.4. Зависимость временного сопротивления на растяжение компаунда марки ЭЗК-31 от температуры, измеренной на образцах, изготовленных в разные годы (область 1 — в 1971 г., область 2 — в 1972 г.)

Увеличение  $\sigma_v$  при отрицательных температурах способствует росту запаса прочности изоляции в тот момент, когда возникают максимальные термоупругие напряжения.

Отклонения от оптимальной рецептуры и технологии приводят к нарушению структуры компаунда, образованию микротрещин и концентраторов напряжений, которые могут оказать существенное влияние на прочностные свойства в условиях изготовления и эксплуатации.

На рис. 4.4 приведены области разброса значений временного сопротивления на растяжение при кратковременном нагружении. Кривые получены из различных партий исходных материалов, составляющих компаунд. Технология изготовления также имела незначительные различия по режиму перемешивания и вакуумирования. Из кривых следует, что при отсутствии мер по стабилизации прочностных свойств компаунда колебания значений  $\sigma_v$  могут превышать 20%. Отмечались случаи, когда прочность снижалась в 2 раза.

Ниже рассматриваются некоторые примеры влияния рецептурно-технологических факторов на прочностные свойства эпоксидной изоляции.

1. Интенсивность и продолжительность перемешивания смолы с наполнителем и отвердителем в вакуум-смесителях сказывается на равномерности распределения и степени диспергирования капель отвердителя в массе компаунда. Оптимальный режим перемешивания обеспечивает более полное отвер-

растяжение для компаунда с массовой долей наполнителя 250% находится в области  $-60^\circ\text{C}$ .

Более интенсивное снижение прочности у ненаполненных компаундов по сравнению с наполненными в области отрицательных температур, по-видимому, связано с двумя факторами:

1) более высокими значениями внутренних механических напряжений, возникающих у образцов с ненаполненным компаундом в процессе изготовления, вследствие большой разности ТКЛР компаунда и материала заливочной формы;

2) большей свободой развития микротрещин, тогда как у наполненных компаундов частицы наполнителя могут блокировать процесс развития трещины.

ждение во всем объеме и улучшает гомогенность отливки. При продолжительном перемешивании и вакуумировании компаунда с отвердителем происходит неравномерное или избыточное улетучивание отвердителя. Отмечено также ухудшение на 10...20% физико-механических свойств компаунда относительно значений, полученных при оптимальных характеристиках перемешивания, а также повышение его хрупкости и жесткости.

2. Тип наполнителя и тщательность перемешивания компаунда отражается на оседаемости наполнителя. Степень оседаемости зависит от размера и удельного веса частиц наполнителя, вида смолы и вязкости наполненного компаунда. Чем меньше частицы, тем слабее проявляется тенденция к выпадению в осадок.

3. Степень вакуума [21] отражается на однородности структуры. Низкий вакуум приводит к появлению воздушных включений, которые также могут явиться концентраторами напряжения, избыточно низкий вакуум и его продолжительность — к улетучиванию, а следовательно, к недостатку отвердителя. Избыточное давление оказывает благоприятное влияние при значениях  $3 \cdot 10^5 \dots 9 \cdot 10^5$  Па. Повышение давления выше указанных норм может послужить при отверждении причиной появления дополнительных внутренних напряжений.

4. Степень отверждения проявляется в плотности шивки и физическом взаимодействии межузловых отрезков пространственной решетки. Избыточное количество отвердителя образует полимер с более гибкой и резкой пространственной структурой [22], что ухудшает физико-механические свойства отвержденного компаунда.

5. Медленное отверждение компаунда при температурах, превышающих не более чем на  $10 \dots 15^\circ \text{C}$  температуру начала экзотермической реакции, увеличивает временное сопротивление на растяжение. При этом достигается большая частота трехмерной структуры по сравнению с частотой структуры при более высоких температурах полимеризации, когда процесс сопровождается активной экзотермической реакцией и большими вероятностями возникновения локальных напряжений и микротрещин.

6. Недостаточно тщательное удаление перед заливкой пропиточного состава, отличающегося от заливочного компаунда своими термоупругими характеристиками, проявляется в увеличении степени неоднородности изоляции, так как отвержденный пропиточный состав служит концентратором напряжений и является дополнительным источником образования деформаций.

7. Предварительная сушка (или подсушивание) перед заливкой пропитанной обмотки приводит к образованию пустот в момент стекания избытка компаунда. Проникновение заливочного компаунда в эти пустоты затруднительно вследствие его большой вязкости и наличия пленок полимеризованного пропи-

точного состава. Влияние этих пустот на физико-механические свойства эпоксидной изоляции связано с образованием неоднородной структуры заливки. Кроме того, наличие отвержденной или полутвержденной пленки на поверхности предварительно подсушенной обмотки снижает адгезионную прочность заливочного компаунда.

8. Скорость остывания полимеризованного компаунда сказывается на термоупругих характеристиках, что связано с релаксационными процессами. Для компаунда марки ЭЗК-31 снижение скорости остывания ниже чем 10 К/ч не влияет на остаточные термоупругие напряжения эпоксидной изоляции.

#### 4.1.2. Термопласты.

В равной мере рецептурно-технологические факторы влияют на механическую прочность и других полимерных изоляционных материалов, рассматриваемых в данной работе. Уже на стадии синтеза полимера, создания на его основе композиций различного состава и изготовления изделия формируются предпосылки, влияющие на механическую прочность. Дефекты материала, в частности в его поверхностном слое, оказывают решающее влияние на концентрацию деформаций и возникновение зон повреждений с дальнейшим появлением первых трещин. Рост образования трещин происходит по-разному, в зависимости от условий эксплуатации.

Влияние на механические свойства полиолефинов может достигаться не только применением различных стабилизирующих добавок, но и соответствующими условиями получения полимера или регулированием размеров надмолекулярных образований. Формирование последних происходит при переработке полимера в изделие и зависит от природы вводимых добавок, способа и режимов переработки.

Таблица 4.2

Наполнитель	Содержание наполнителя, %	Показатель текучести расплава, г/10 мин	Морозостойкость, °С	Относительное удлинение при разрыве, %	Временное сопротивление на растяжение, МПа
Без наполнителя	—	0,281/0,322	—70/—70	535/256	22,4/24,4
Каолин	5	0,225/0,249	—70/—60	350/310	21,9/23,6
	15	0,167/0,339	—70/—40	30/0	22,3/23,9
	30	0,144, 1,070	—20/—20	0/хрупкий	20,5/хрупкий
Тальк	5	0,271/0,340	—70/—70	20... 240/20	22,1/25,6
	15	0,257/0,275	—70/—40	0/0	19,9/25,3
	30	0,219/0,230	—20/—20	0/0	14,3/19,1

Примечание. Изменения свойств материала марки ПЭВД в зависимости от содержания наполнителя до (в числителе) и после (в знаменателе) старения при 20 °С в течение 1500 ч.

Как видно из табл. 4.2, повышение содержания наполнителя приводит к уменьшению относительного удлинения, ухудшается морозостойкость, появляется хрупкость и тенденция к снижению временного сопротивления на растяжение материала марки ПЭВД.

Различное действие наполнителей объясняется их влиянием на формирование надмолекулярной структуры полиэтилена. Более устойчивыми оказываются наиболее мелкодисперсные структуры. Крупносфералитная структура способствует появлению локальных напряжений, что облегчает растрескивание материала при тепловом старении.

Введение в полиэтилен различных стабилизирующих добавок оказывает защитное действие. Физико-механические свойства сохраняются в течение 5 лет и затем могут медленно изменяться в продолжении 20 лет.

Пределы показателей основных физико-механических свойств для различных марок ПЭВД при 20° С:

Плотность, г/см <sup>3</sup> . . . . .	0,918 . . . 0,930
Разрушающее напряжение, МПа, при:	
растяжении . . . . .	10,0 . . . 17,0
статическом изгибе . . . . .	12,0 . . . 17,0
срезе . . . . .	14,0 . . . 17,0
Относительное удлинение при разрыве, % . . . . .	500 . . . 600
Модуль упругости при изгибе, МПа . . . . .	9,0 . . . 16,0
Относительное удлинение в начале процесса, % . . . . .	15 . . . 20
Твердость по Бринеллю, МПа . . . . .	14 . . . 25

С увеличением скорости растяжения образца разрушающее напряжение при растяжении и относительное удлинение при разрыве уменьшаются, а предел текучести при растяжении растет. С повышением температуры разрушающее напряжение полиэтилена при растяжении, сжатии, изгибе и срезе понижается, а относительное удлинение при разрыве возрастает до определенного предела, после которого также начинает снижаться.

В зависимости от температуры механическая прочность ПЭВД изменяется следующим образом:

Температура, °С . . . . .	20	40	60	80
Предел прочности, МПа:				
при сжатии . . . . .	12,6	7,7	4,0	—
при статическом изгибе . . . . .	11,8	8,8	6,0	—
при срезе . . . . .	16,9	16,1	9,2	5,3

Изменение температурных коэффициентов расширения в зависимости от температуры приведено ниже:

Температура, °С . . . . .	—50 . . . 0	20 . . . 30	40 . . . 50	60 . . . 70	80 . . . 90
Температурный коэффициент расширения, К <sup>-1</sup> :					
линейный . . . . .	15	18	30	34	51
объемный . . . . .	46	55	89	102	152

В процессе изготовления изделий наблюдается термическая усадка и связанное с ней внутреннее напряжение.



Физико-механические свойства материала ПЭНД при 20° С имеют следующие значения:

Плотность, г/см <sup>3</sup> . . . . .	0,949 . . . 0,955
Разрушающее напряжение, МПа, при:	
растяжении . . . . .	22,0 . . . 30,0
изгибе . . . . .	20,0 . . . 30,0
Относительное удлинение при разрыве, % . . . . .	30,0 . . . 80,0
Модуль упругости при изгибе, МПа . . . . .	65,0 . . . 75,0
Предел текучести при растяжении, МПа . . . . .	22,0 . . . 27,0
Относительное удлинение в начале процесса, % . . . . .	20 . . . 12
Твердость по Бринеллю, МПа . . . . .	45 . . . 58

Материал марки ПЭНД более жесткий, чем марки ПЭВД и имеет модуль упругости при изгибе и температуре 20° С в 3 раза, а при 50° С — в 1,5 раза большее значение.

Механическая прочность при растяжении обуславливается релаксационными процессами и поэтому зависит от скорости и времени воздействия. Ударная вязкость полиэтилена характеризуется работой, затраченной на разрушение образца, а также зависит от молекулярной массы образца.

Рабочая температура изделий из полиэтилена составляет 80 . . . 90° С и зависит от давления, продолжительности нагружения и других условий эксплуатации.

Для высокочастотных изоляционных конструкций наиболее часто применяется фторопласт-4 (Ф-4). Этому способствуют не только высокие диэлектрические свойства на высоких частотах и теплостойкость, но также и сравнительно хорошие для полимера механические характеристики. Плотность его в зависимости от температуры меняется от 2,27 г/см<sup>3</sup> при  $t = -50^{\circ}\text{C}$  до 2,14 г/см<sup>3</sup> при  $t = +125^{\circ}\text{C}$ . Максимальная рабочая температура при эксплуатации + 260° С.

Физико-механические свойства полимера марки Ф-4 при температуре от + 80 до — 40° С:

Разрушающее напряжение, МПа, при:	
растяжении образца:	
незакаленного . . . . .	14,0 . . . 35,0
закаленного . . . . .	16,0 . . . 31,5
деформации при сжатии:	
1 %-ной . . . . .	10,0
10 %-ной . . . . .	18,5
статическом изгибе . . . . .	11,0 . . . 14,0
Модуль упругости при 20° С, МПа, при:	
изгибе . . . . .	47,0 . . . 85,0
сдвиге . . . . .	27,0
Водопоглощение за 24 ч, % . . . . .	0,00
Относительное удлинение при разрыве, % . . . . .	250 . . . 500

Фторопласт может использоваться при криогенных температурах. Его разрушающее напряжение при сжатии с деформацией 0,2% составляет 17,5 . . . 19,6 МПа при температуре жидкого гелия — 269,3° С.

Ползучесть при 100°С и нагрузке 2,8 МПа за 24 ч составляет 5,58%, а за 4 сут — 5,9%.

Температурный коэффициент линейного расширения при температуре от — 50 до + 25°С составляет  $13,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , а при температуре от 25 до 100°С —  $12,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

Причиной возникновения хладотекучести или «псевдотечения» материала марки Ф-4 является процесс рекристаллизации, начинающийся в образце при достижении определенного напряжения растяжения или сжатия, которое можно назвать пределом псевдотекучести ( $\sigma_n$ ). Значение этого предела зависит от температуры, скорости нарастания растягивающей нагрузки или продолжительности действия нагрузки при сжатии.

Зависимость предела псевдотекучести от температуры приведена ниже:

Температура, °С	25	50	75	100	150	200	250
Предел псевдотекучести, МПа	14,2	10,6	8,3	6,7	4,6	3,5	2,8

Последние годы в качестве высокочастотных термопластов получили распространение стекло-, талько- и слюдонаполненные полипропилены, их композиции под названием силпон, поли-4-метилпентен-1, темплен термостойкий, стеклонаполненные полиамиды, композиции полифенилоксидов под общим названием арилоксы (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Материал	ТКЛР, $\times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	Показатель текучести расплава, г/10 мм	Временное сопротивление, МПа		Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>
			при растяжении	при изгибе	
Полипропилен:					
стеклонаполненный	1,9	2...4	35	—	—
тальконаполненный	—	2...6	27...29	46	10...25
слюдонаполненный	—	—	20	—	—
Силпон	—	0,4...3,5	20	—	—
Поли-4-метилпентен-1	11,7	0,2...4,0	24	—	10...30
Темплен термостойкий	—	5...15	—	—	10...20
Полиамид стеклонаполненный ПА66-ДС	—	—	128...152	172...176	24,5
Арилокс	—	1...10	20	45	20...40

Помимо хороших значений  $\text{tg } \delta$  ( $10^{-3} \dots 10^{-4}$ ), высоких значений  $\rho_{\text{вр}}$ , влагостойкости, малых значений усадки, диапазону рабочих температур от — 50... — 60°С до + 80... 100°С, за исключением стекло- и тальконаполненных полипропиленов, арилоксы обладают более высокими механическими свойствами по сравнению со своими ненаполненными термопластами.

Как видно из табл. 4.3, полиамид стеклонаполненный обладает повышенными прочностными свойствами.

Выбор термопластов для каждого конкретного случая определяется совокупностью всех электрофизических, физико-механических и технологических свойств.

#### 4.1.3. Стеатитовая керамика.

Высокочастотная керамика относится к материалам с хрупким разрушением. Пределы упругости практически совпадают. Отмечается большая разница в прочности, которая зависит от вида нагрузки и может быть вызвана различными причинами, например внутренними напряжениями, микротрещинами и др.

Причиной возникновения внутренних напряжений, снижающих механическую прочность при воздействии внешней нагрузки, является многофазность керамики. Если керамика состоит только из двух фаз — кристаллической и стекловидной, то внутренние напряжения зависят от степени анизотропии этих фаз. Можно считать, что уменьшение размеров элементарных кристаллов приводит к повышению механической прочности керамики.

Численные значения механической прочности керамики в большей мере определяются методикой испытания. Важное значение при механической нагрузке имеет степень равномерности распределения усилий по сечению изделия или образца. При внецентренном растяжении результаты будут сильно различаться. При испытаниях, на сжатие для непришлифованных поверхностей результаты могут различаться в три раза.

Наиболее воспроизводимой из механических характеристик является предел прочности на изгиб.

Для стеатитовой керамики марки Б-17 временные сопротивления на растяжение, сжатие и при статическом изгибе соответственно равны 47,0; 22,0 и 130,0...150,0 МПа, удельная ударная вязкость — 3 Дж/м<sup>2</sup>, а модуль упругости  $0,12 \cdot 10^{-6}$  МПа.

Отмечается уменьшение механической прочности цилиндрических образцов фарфора при увеличении площади сечения для различных видов деформации в сравнении с прочностью стандартных образцов. Наименее подвержены изменениям значения прочности в зависимости от площади сечения при испытаниях на сжатие, а наиболее — при испытаниях на изгиб. Снижение предела прочности при увеличении площади сечения объясняется неоднородностью структуры материала (масштабный фактор).

Известно также влияние на прочность керамики поверхностных микротрещин. Процесс разрушения тела под нагрузкой начинается с удлинения трещины. Микротрещины возникают вследствие коррозии и абразивных повреждений. Причиной может явиться углубление между элементарными кристаллами.

Влиянием трещин можно объяснить и зависимость механической прочности от формы образца. Например прочность при статическом изгибе уменьшается при переходе от цилиндрического к прямоугольному образцу с 250 до 169 МПа. Приведенная зависимость объясняется увеличением неравномерности внутренних напряжений в прямоугольном образце.

Упрочнение керамики достигается устранением трещин с по-

поверхности посредством закалки, травления или покрытия специальными пленками (глазуриями).

Глазурование поверхности стеатита марки Б-17 составом с близким значением ТКЛР повышает предел прочности на изгиб с 130...140 до 150...160 МПа.

При воздействиях температуры на стеатит Б-17 добавочные внутренние напряжения возникают начиная с 800° С.

Более существенна зависимость прочности керамики от термоудара, стойкость к которому определяется эмпирической формулой

$$F = \sigma_b / (\alpha E') \sqrt{\lambda / (\rho c)},$$

где  $\alpha$  — ТКЛР,  $E'$  — модуль Юнга;  $\lambda$  — удельная теплопроводность;  $\rho$  — плотность;  $c$  — удельная теплоемкость.

Как следует из уравнения, термическая стойкость тем выше, чем больше прочность на растяжение и теплопроводность и чем меньше ТКЛР, плотность и теплоемкость материала. В основе описанного явления также лежат процессы образования внутренних термоупругих напряжений.

#### 4.1.4. Стеклопластики.

Стеклоэпоксидные материалы изготавливаются из бесщелочных стекломатериалов, пропитанных связующими на основе эпоксидных смол. В качестве наполнителей могут использоваться нити в одном или в двух направлениях, волокна рубленые или в виде мата, стеклоткани.

На прочностные свойства стеклопластиков, помимо прочности исходных материалов, влияют напряжения, возникающие при отверждении композиции на границе раздела волокно—матрица вследствие различий ТКЛР, модулей Юнга и коэффициентов Пуассона. Усадочные остаточные напряжения зависят от скорости нагрева, охлаждения, температуры полимеризации и ее продолжительности. Повторной термообработкой можно добиться релаксации этих напряжений в пределах 10%.

Полимерная матрица должна обеспечивать совместную работу армирующих волокон в процессе деформации и монолитность материала. Вид обработки поверхности волокна влияет на прочность пластика.

Пределы прочности образцов марки СТЭФ, вырезанных вдоль утка ткани при статическом изгибе перпендикулярно слоям, для листов толщиной 10 мм и выше составляют примерно порядка 400 МПа, при растяжении — 368...442 МПа и 210...230 МПа для СТЭФ-1. Удельная ударная вязкость перпендикулярно слоям образцов, вырезанных вдоль утка ткани, составляет от 40 до 10 кДж/м<sup>2</sup>.

## 4.2. КРАТКОВРЕМЕННАЯ И ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ

Изменение механической прочности твердых диэлектриков обуславливается как химическими, так и физическими превра-

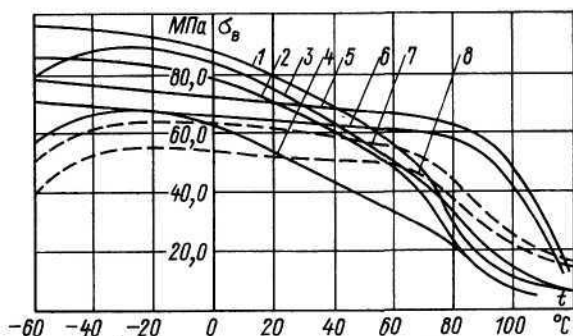


Рис. 4.5. Зависимость временного сопротивления на растяжение от температуры при разных скоростях нагружения

1 — ЭЗК-31,  $v_1=25,6$  Н/мин; 2 — ЭЗК-31,  $v_2=0,65$  Н/мин; 3 — ЭЗЛ-120,  $v_1=25,6$  Н/мин;  
 4 — ЭЗЛ-120,  $v_2=0,65$  Н/мин; 5 — ЭЗК-20,  $v_1=25,6$  Н/мин; 6 — ЭЗК-20,  $v_2=0,65$  Н/мин;  
 7 — ЭЗК-10,  $v_1=32,5$  Н/мин; 8 — ЭЗК-10,  $v_2=0,45$  Н/мин

щениями. В пределах одного физического состояния материал разрушается при условии, что подведенная энергия независимо от природы внешних сил превышает суммарную энергию связей, противодействующих разрушению.

Химические изменения полимерных материалов протекают в результате взаимодействия материала с кислородом, водой, различными химическими соединениями. Большинство химических превращений происходят под влиянием температуры, световой и проникающей радиации.

В массивных изоляционных конструкциях окисление сопровождается образованием на тонком слое поверхности субмикронных и макротрещин, которые при последующей механической нагрузке получают свое дальнейшее развитие. То же относится и к внутренним трещинам. Механические и электрические воздействия в большинстве случаев способствуют ускорению химических изменений. Они могут происходить как на межмолекулярном, так и на внутримолекулярном уровне.

К числу внешних факторов, активизирующих физический процесс старения, относятся механические нагрузки, которые могут быть статическими или динамическими.

При температурах ниже температуры стеклования скорости механически активированных процессов старения значительно выше скоростей «самопроизвольного» старения и сводятся в основном к ускорению релаксационных процессов.

#### 4.2.1. Эпоксидные компаунды.

Наиболее характерные изменения при старении имеют место в эпоксидных компаундах. Окончательному разрушению в них предшествует постепенное развитие различных дефектов и трещин в напряженном материале. Скорости разрушения увеличивается с ростом напряжения и температуры, т. е. с ростом кинетической энергии молекул.

На рис. 4.5 показано изменение прочности жестких эпоксидных компаундов в зависимости от температуры и скорости изменения нагружения. В стеклообразном состоянии прочность с повышением температуры мало изменяется. Переход материала из стеклообразного состояния в высокоэластическое сопровождается значительным снижением прочности.

Из приведенных кривых также следует, что при медленном нагружении образцов со скоростью  $v_2 \ll v_1$  ( $v_1 = 32,5 \dots 25$  Н/мин,  $v_2 = 0,65 \dots 0,45$  Н/мин) в компаундах успевают развиться процессы старения и временные сопротивления при  $v_2$  снижаются по сравнению со значениями при скорости нагружения  $v_1$ .

С повышением температуры влияние скорости нагружения на прочность становится менее выраженным.

В работе [23] было найдено, что в стеклообразном состоянии временное сопротивление на растяжение при длительном нагружении жестких компаундов относительно кратковременного ( $t < t_c$ ) изменяется в соответствии со следующими значениями:

Продолжительность нагружения, ч . . . . .	15	1000	10 000	50 000
Изменение временного сопротивления на растяжение, % . . . . .	33	40	45	51

В высокоэластическом состоянии каждый компаунд в момент повышения температуры при длительном нагружении будет характеризоваться соотношением  $\sigma_{в.д}/\sigma_{в}$ .

Температурно-временная зависимость прочности жестких компаундов может определяться из выражения, в котором время разрушения

$$\tau_p = \tau_0 \exp [U_0' - \gamma\sigma/kT], \quad (4.1)$$

где  $\tau_0$  — постоянная, численно равная периоду тепловых колебаний атомов;  $U_0'$  — энергия активации элементарного акта процесса разрушения при отсутствии нагружения;  $\gamma = k(PT - q)$  — структурно-чувствительный коэффициент материала, параметры которого определяются экспериментальным путем;  $\sigma$  — нагрузка;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура.

Значения, к которым асимптотически стремится условный предел прочности при  $\tau = 10\ 000$  ч в зависимости от температуры (по Терентьеву), приведены в табл. 4.4.

Общими для всех компаундов является снижение прочности вне области температуры стеклования, но у каждого типа материала это снижение проявляется в разной степени. Такая закономерность характерна и для других полимерных материалов.

Компаунд марки ЭЗЛ-120 имеет незначительную длительную прочность, хотя кратковременная прочность его выше, чем у компаундов ЭЗК-10 и ЭЗК-20. Такой характер изменения прочности можно объяснить ослаблением при повышении температуры межмолекулярных связей вследствие наличия пластификатора.



Таблица 4.4

Температура, °С	Временное сопротивление, МПа, компаунда марок				
	ЭЗК-10	ЭЗК-20	ЭЗК-31	ЭЭЛ-120	ЭПК-1
-60	15,3	39,3	49,3		—
-40	25,3	41,6	49,4		—
-20	35,3	46,0	50,0		17,4
+20	32,3	43,0	39,3	< 1,0	26,7
+60	29,2	40,6	25,0		19,5
+70	28,7	39,8	16,5		15,0
+80	21,0	39,3	13,5		9,0
+100	12,2	29,3	5,0		—

Зависимость длительного временного сопротивления на растяжение от температуры, так же как и прочности при кратковременном нагружении, свидетельствуют о высокой прочности компаунда ЭЗК-31 при отрицательных температурах. В то же время видно, что более высокой теплостойкостью обладают компаунды марок ЭЗК-10 и ЭЗК-20.

Из сравнения одинаковых по составу наполненного (ЭЗК-31) и ненаполненного (ЭПК-1) компаундов следует, что наполнитель увеличивает длительную прочность.

Приводимые в некоторых работах данные о стабильности в течение длительного времени прочностных характеристик жестких компаундов распространяются только на образцы, не имеющие значительных остаточных напряжений. Эпоксидная изоляция изделий, находящаяся, как правило, под воздействием остаточных температурных напряжений, с течением времени изменяет свои прочностные свойства аналогично данным, приведенным в табл. 4.4.

Работоспособность компаунда целесообразно оценивать по отношению временного сопротивления при длительном нагружении к внутренним напряжениям при данной температуре, которые определяются по терморелаксационной характеристике. Такие отношения получили название «критерия работоспособности» и имеют смысл запаса прочности (рис. 4.6).

Зависимости значений критериев кратковременной и длительной работоспособности от температуры имеют одинаковый характер. Сравнение прочностных свойств посредством критерия работоспособности подтверждается экспериментально при заливке стальных сердечников компаундами разных типов. При охлаждении сердечников различной геометрии, но с одинаковой площадью сечения, помимо выбора типа компаунда, можно определить коэффициент концентрации образцов.

Момент растрескивания компаунда фиксируется разрывом цепи тонкой константановой изолированной проволоки с включенным последовательно миллиамперметром. Эти, так называемые «датчики разрушения» устанавливаются вокруг сердечни-

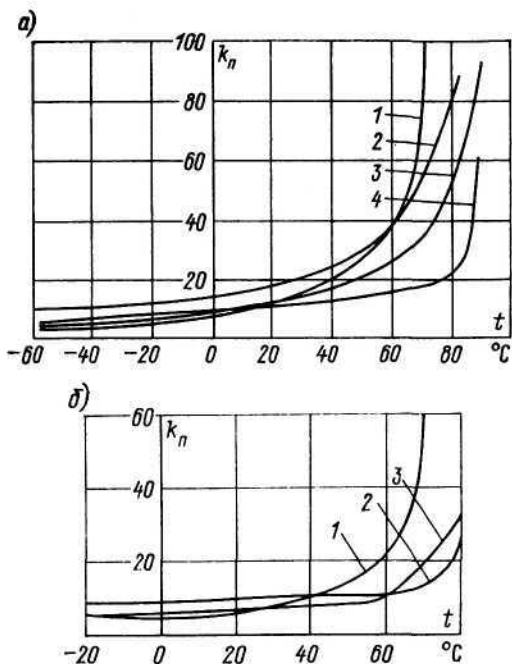


Рис. 4.6. Зависимость критерия кратковременной (а) и длительной (б) работоспособности от температуры  
 1 — ЭЗК-10 с отвердителем МТГФА; 2 — ЭЗК-31; 3 — ЭЗК-20; 4 — ЭЗЛ-120

ков до заливки компаунда. По температуре образования трещин, в соответствии с зависимостью  $\sigma_{\text{в}} = f(t)$  определяется напряжение  $\sigma_{\text{экв max}}$ .

Таблица 4.5

Марка компаунда	Характеристика	Геометрия образцов			
		круг- лый	пяти- гран- ный	квад- ратный	прямо- угольный (1 : 2)
ЭЗК-10	Температура холодоустойчивости, °С	-32	-20	+6	+18
	Эквивалентные напряжения, МПа	35,0	42,0	58,0	67,0
	Коэффициент концентрации	1,0	1,2	1,6	1,9
ЭЗК-31	Температура холодоустойчивости, °С	-100	-75	-70	-32
	Эквивалентные напряжения, МПа	28,0	35,0	36,0	49,0
	Коэффициент концентрации	1,0	1,2	1,25	2,0

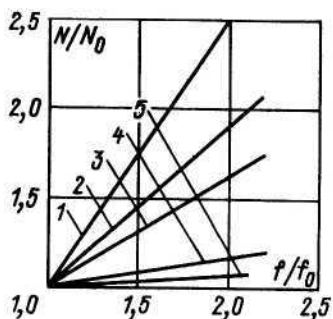


Рис. 4.7. Влияние частоты на число циклов до разрушения для компаунда марки ЭЗК-31 при различных отношениях

1 —  $\sigma_T/\sigma_n=0,76$ ; 2 — 0,66; 3 — 0,6;  
4 — 0,56; 5 — 0,50

Концентраторами напряжений в полимерной изоляции могут также служить неоднородности структуры: поры, раковины, отслоения, локальные концентрации наполнителей вследствие оседаемости или плохого перемешивания. Максимальные местные напряжения в местах концентрации могут быть значительно выше средних и привести к преждевременному растрескиванию.

Исследование влияния частоты вибрационной нагрузки на прочность образцов из эпоксидного компаунда марки ЭЗЛ-120 [24] показали наличие тех же закономерностей разрушения, что и при вибрации для других жестких пластмасс. Разрушение возникает из-за нарушения связей вследствие роста термофлюктуационных процессов и накопления микротрещин, вызывающих структурные изменения материала.

На рис. 4.7 по оси абсцисс отложено отношение частоты  $f$  к базовой первоначальной частоте  $f_0 = 25$  Гц, по оси ординат — отношение числа циклов  $N$  до разрушения при различных частотах к числу циклов  $N_0$  до разрушения при базовой частоте  $f_0$ .

Образцы испытывались на установке, создающей растягивающее напряжение по закону  $\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t$ , где  $\sigma_m$  — постоянная составляющая напряжения;  $\sigma_a$  — амплитуда переменной составляющей напряжения.

Увеличение частоты повышает температуру материала и снижает его прочность.

При вибрации отмечается также отрицательное влияние на прочность повышения температуры окружающей среды, роста амплитуды и нагружения, а также влияние формы образца.

Периодические паузы в процессе динамической нагрузки и однородность структуры материала способствуют более равно-

Коэффициенты концентрации для образцов (табл. 4.5) получены как отношение значений  $\sigma_{\text{экв}}(\text{max})$  данного образца к круглому.

Из данных, приведенных в табл. 4.5, видно, что большей холодоустойчивостью обладает компаунд марки ЭЗК-31. Квадратные и прямоугольные образцы из компаунда ЭЗК-10 растрескались еще в период остывания после полимеризации при положительных температурах.

Большие значения эквивалентного напряжения для прямоугольного, квадратного и пятигранного образцов объясняются более коротким временем их разрушения, т. е. большей скоростью нагружения.

мерному распределению напряжения и повышают вибропрочность компаунда.

В работе [20] исследовано влияние больших значений напряженности равномерного электрического поля на механическую прочность (рис. 4.8). При напряженности  $E = 0,8E_{пр}$  происходит снижение временного сопротивления на 15...20%. При меньших напряженностях влияние электрического поля уменьшается, однако корреляционная связь четко прослеживается до  $E = 0,2E_{пр}$ .

Влияние на долговечность эпоксидного компаунда марки ЭПК-5 механической и электрической нагрузки такой в отдельности и при одновременном воздействии приведено в табл. 4.6.

Из данных, приведенных в табл. 4.6, видно, что при каждом виде нагружения долговечность в зависимости от уровня нагрузки имеет одинаковый характер изменений.

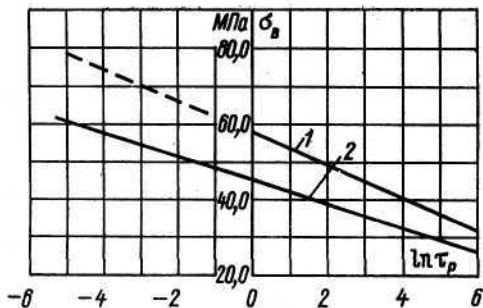


Рис. 4.8. Срок службы компаунда ЭК-31 при механической нагрузке (кривая 1) и при одновременном воздействии механической и электрической нагрузок (кривая 2)

Таблица 4.6

Механическое нагружение		Электрическое нагружение		Совместное нагружение	
Уровень напряжений $\sigma_p/\sigma_b$	Долговечность $\tau_p, ч$	Уровень напряжений $E_p/E_k$	Долговечность $\tau_p, ч$	Уровень напряжений $\sigma_p/\sigma_b + E_p/E_k$	Долговечность $\tau_p, ч$
0,5	354,0	0,5	293,0	0,5	15,0
0,6	45,3	0,6	63,0	0,6	0,62
0,7	7,48	0,7	18,2	0,7	0,019
0,8	0,65	0,8	0,28	0,8	0,002

Примечание.  $\sigma_b = 79,0$  МПа;  $E_k = 50$  МВ/м (при толщине  $l = 1$  мм).

При одновременном механическом и электрическом нагружении долговечность снижается на 1...2 порядка по сравнению с каждым из видов нагружения в отдельности.

Резкое снижение долговечности при одновременном нагружении объясняется тем, что рост дефектов под воздействием механических напряжений сопровождается развитием ионизационных процессов в электрическом поле. В свою очередь, электрическое поле увеличивает подвижность кинетических элементов эпоксидного компаунда, что облегчает механическое разрушение диэлектрика.

Время наработки при механическом разрушении под воздей-

ствием механической и электрической нагрузки в первом приближении можно определить из выражения (4.1), обозначив  $\sigma = \sigma_m + \sigma_e$  — суммарные механические напряжения в диэлектрике;  $\sigma_m$  — механические напряжения в диэлектрике от внешней силы;  $\sigma_e = \epsilon_0 - \epsilon / (2\delta^2) = U^2$  — механические напряжения в диэлектрике от воздействия электрического поля.

Влияние электрического поля на прочностные свойства компаунда проявляется как в усилении термофлюктуационных процессов, так и в ускоренном росте микротрещин, приводящих к образованию генеральной трещины.

#### 4.2.2. Термопласты.

Изменение механических свойств полиэтилена в естественных условиях средних широт качественно различается в зависимости от толщины образцов. При толщине 5 мм образцы в течение трех лет сохраняют первоначальное значение разрушающего напряжения при растяжении, а при 3 мм — только в течение 10 мес. Установлено, что в приповерхностных слоях концентрация карбонильных групп, особо чувствительных к окислительным процессам, наибольшая. По мере удаления от поверхности к центру образца она убывает.

Циклические механические воздействия (изгиб, растяжение) приводят постепенно к изменению механических свойств таких полимерных материалов, как полиэтилен, фторопласт-4, капролон и др.

С увеличением числа циклов деформация материалов возрастает для каждого из материалов по-разному. У фторопласта и капролона изменения с наибольшей быстротой происходят в начале испытаний. Затем деформация увеличивается примерно одинаково. Через некоторое число циклов деформация уменьшается и становится постоянной.

В образцах из ПЭВД также сначала происходит резкое увеличение деформации, но последующее увеличение не имеет такого равномерного характера, как у фторопласта и капролона, и затем полностью стабилизируется. Таким образом, в результате усталости происходит постепенное изменение структуры материалов, вследствие чего уменьшается прочность.

При отсутствии воздействия на материалы в течение 20... 24 ч их стойкость к циклическим воздействиям частично восстанавливается, деформация полимеров значительно уменьшается.

Механические свойства полиэтилена при растяжении обуславливаются релаксационными процессами и поэтому зависят от скорости нарастания усилий.

Зависимость разрушающего напряжения при растяжении и относительно удлинения при разрыве от температуры приведена в табл. 4.7.

Из табл. 4.7 видно, что разрушающее напряжение с ростом температуры от 40 до 80° С сокращается в 2 раза.

Для кабельного светостабилизированного полиэтилена марки

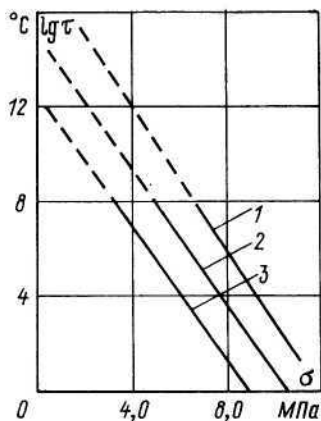


Рис. 4.9. Зависимости длительного временного сопротивления полиэтилена марки 153-09К от нагрузки при температуре 20°С (кривая 1), 40°С (кривая 2) и 60°С (кривая 3)

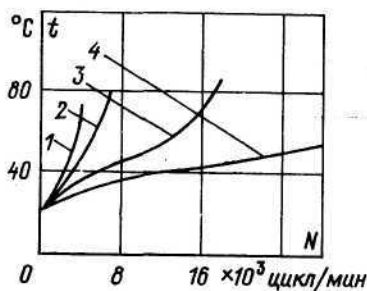


Рис. 4.10. Зависимость нагрева от уровня напряжения при пульсирующем напряжении ( $N = 1$  цикл/мин), равном 0,32 Па (кривая 1), 0,3 Па (кривая 2) 0,27 Па (кривая 3) и 0,25 Па (кривая 4)

153-09К были определены сроки службы в зависимости от нагрузки (рис. 4.9). Эксперименты показали, что для срока службы 3650 ч при температуре 40°С удельная нагрузка не должна превышать 0,30 МПа.

Таблица 4.7

Температура, °С	Разрушающее напряжение, МПа			Относительное удлинение, %		
	ПЭВД	ПЭНД ( $m=30\ 000$ )	ПЭНД ( $m=350\ 000$ )	ПЭВД	ПЭНД ( $m=30\ 000$ )	ПЭНД ( $m=350\ 000$ )
-60	35	—	50	100	—	—
-40	30	—	45	220	—	100
0	18	30	35	550	—	300
+40	9,5	19	29	520	300	1000
+80	5,0	10	20	350	1000	1800
+100	4,0	7,0	15	200	1400	2200

Примечание.  $m$  — молекулярная масса.

Такие же нагрузки рекомендуются и для других марок полиэтилена.

Длительная прочность полиэтилена в зависимости от нагрузки и температуры в логарифмическом масштабе приведена на рис. 4.10. Видно, что срок службы сокращается с ростом температуры и нагрузки.

Прочность полиэтилена при знакопеременной нагрузке находится в прямой зависимости от количества циклов по симметричному циклу и уменьшается с ростом их количества.



Прочность при знакопеременном изгибе по симметричному циклу при  $t = 20^\circ \text{C}$  приведена ниже:

$\lg n$	8	6	4	2	0
$\sigma_{изг}, \text{МПа}$	0,5	2	3,5	5,2	8

Механические свойства фторопласта-4 также существенно зависят от температуры (табл. 4.8).

Таблица 4.8

Температура, $^\circ\text{C}$	-60	-40	-20	0	+20	+40	+60	+80	+100
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	—	35	32,5	30	20	18	—	13,5	11,5
Относительное удлинение при разрыве, %	—	70	100	150	470	—	—	600	240
Модуль упругости при сжатии, МПа	1800	1700	1500	1100	700	450	330	240	170

Из табл. 4.8 следует, что при воздействии положительных температур механические свойства фторопласта-4 значительно ухудшаются и при  $t = 100^\circ \text{C}$  разрушающее напряжение при растяжении уменьшается практически в 2 раза по сравнению с нормальной температурой.

Одним из важных прочностных показателей является предел текучести при растяжении, т. е. напряжение, при котором возникают остаточные деформации. Он зависит от степени кристалличности, скорости растяжения и температуры (табл. 4.9).

Таблица 4.9

Деформация, %	Нагрузка, МПа, вызывающая деформацию при температуре, $^\circ\text{C}$ , равной					
	-50	0	+25	+50	+100	+150
1	20,3	15,7	6,2	4,9	3,1	1,7
2	30,4	21,0	9,2	6,6	3,9	2,7
3	35,0	23,6	10,5	7,7	4,8	3,3
4	37,4	25,1	12,0	8,5	5,9	3,9
5	39,0	26,1	12,7	9,2	6,2	4,4

При использовании фторопласта-4 следует учитывать ползучесть (табл. 4.10), т. е. деформации при длительном воздействии нагрузки, которые рассчитываются по формуле

$$\lg \gamma_\tau = \lg \gamma_1 + a \lg t,$$

где  $\gamma_\tau$  — деформация за  $\tau$  суток;  $\gamma_1$  — деформация за 1 сут;  $a$  — коэффициент, зависящий от температуры и в меньшей степени от нагрузки, если она не превышает 50% предела текучести.

Из табл. 4.10 следует, что деформация в зависимости от температуры увеличивается почти в 2 раза и при одинаковой температуре в течение 4 сут практически не меняется.

Таблица 4.10

Температура, °С	Нагрузка, МПа	Деформация, %, в течение		Коэффициент, $a$
		1 сут	4 сут	
40	2,8	2,72	2,87	0,038
100	2,8	5,58	5,90	0,040
140	2,1	4,67	4,94	0,042

#### 4.2.3. Стеклопластики.

Стабильность свойств пластмасс, содержащих волокнистые наполнители, в значительной степени определяется взаимодействием на границе волокна со связующими и строением последнего, а также от природы использованного замасливателя.

На первой стадии теплового старения происходит дополнительное структурирование полимера, которое может затем сопровождаться разрывами связей и образованием новых. Различие в ТКЛР связующего и наполнителя нередко приводит к появлению дефектов в пограничных слоях и отрицательно отражается на механических свойствах стеклопластиков. Наименьшее число дефектов обнаружено при использовании связующего на основе эпоксиполиэфирного компаунда с диановым замасливателем.

Вода вызывает набухание связующего, что сопровождается появлением дефектов в объеме материала. Наличие локальных микротрещин и дефектов облегчает проникновение воды в глубь пластика. Совместное действие воды и теплоты приводят к образованию эрозированных участков, сосредоточенных преимущественно на поверхности и вблизи нес. Такие дефекты резко ухудшают прочностные свойства пластиков.

Указанные факторы, особенно при механической обработке стеклопластиков, требуют дополнительной герметизации с помощью влагостойких покрытий.

Наиболее существенное изменение механических свойств стеклопластиков происходит при циклических температурных или знакопеременных нагрузках. Так, при циклических температурных воздействиях в течение 2400 ч пластик, наполненный стекложгутом, изменяет прочность при изгибе на 21 %, при ударной нагрузке — на 14 %.

Временное сопротивление для стеклопластиков в направлении основы ткани при статической нагрузке в течение  $10^3$  ч и  $t = 20^\circ\text{C}$  уменьшается на 40...45 %, предел прочности при сжатии — на 33...35 %.

В процессе циклического нагружения стеклопластиков при относительно высоких амплитудах наблюдается саморазогрев образцов вследствие перехода части механической энергии в тепловую. При одном и том же нагружении скорости нагрева разных образцов существенно различаются, причем большей скорости соответствует меньшая долговечность.

На рис. 4.10 видно, как для эпоксидных стеклопластиков изменяется температура нагрева при пульсирующем растяжении от уровня нагружения, а из табл. 4.11 — изменение долговечности.

Из табл. 4.11 отчетливо видно увеличение долговечности с уменьшением уровня нагружения и количества циклов.

Таблица 4.11

Цикл/мин	Долговечность, мин, при нагружении $\sigma_{\max}$ , МПа, равном						
	0,32	0,30	0,28	0,27	0,26	0,25	0,20
10	—	—	23,6	92	364	646	—
200	19,5	34,0	—	91	—	277	3500
400	5,5	8,5	—	18	—	84	1500

В работе [25] также показано, что с ростом температуры от 20 до 80°С долговечность, измеряемая количеством циклов в минуту, уменьшается с 1,3 до  $1,1 \cdot 10^4$ , т. е. на 15%.

Разрушение стеклопластиков при циклическом нагружении происходит так же, как и при других видах нагрузки, т. е. после разрушения адгезионных связей между армирующими волокнами и связующим.

#### 4.3. АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ

Качество изготовления и надежность эксплуатации во многих случаях определяются адгезионными свойствами полимеров к материалам, которые в них залиты или запрессованы. Отслоения полимера от поверхности активных или конструктивных деталей могут явиться при нарушении адгезии причиной пробоя или нарушения сплошности изоляции. Указанное в полной мере относится и к другим твердым диэлектрикам (прессованной керамике, ситаллам и др.), если армирование сопутствует формированию изоляционной конструкции.

Адгезионная прочность зависит от следующих основных факторов:

- 1) межмолекулярного или химического воздействия адгезива с залитым материалом (субстратом);
- 2) расстояния между контактирующими точками адгезива и субстрата;
- 3) числа точек контакта, приходящихся на 1 см<sup>2</sup> истинной (активной) площади;
- 4) величины активной площади поверхности, т. е. площади склеивания.

Основной причиной адгезии является силовое поле молекул твердой поверхности субстрата, которое притягивает молекулы, находящиеся в непосредственной близости от этой поверхности вязкоупругого или жидкого полимера. Действие поля молекул

в адгезиве, или в твердом материале, практически распространяется на глубину одной молекулы. Контактный слой образуется поверхностными молекулами полимера, которые в отличие от хаотического и беспорядочного расположения в толще имеют ориентированное и упорядоченное строение.

Учитывая, что межмолекулярное взаимодействие нарушается при увеличении расстояния между адгезивом и субстратом более чем на  $5 \text{ \AA}$ , особое значение приобретает

тщательность обработки поверхности субстрата, отсутствие грязи, пыли, жировых пятен, оксидной пленки и т. д. Исследования показали, что через 2 ч после чистки и обезжиривания поверхности материала на ней может появиться жировая пленка за счет паров воздуха. На рис. 4.11 изображены зависимости толщины оксидной пленки от времени нахождения в воздухе.

Действие эпоксидного компаунда как адгезива может быть вызвано различными сочетаниями межмолекулярного взаимодействия: ориентационного, индукционного, дисперсного и взаимодействия на основе водородной связи. Наличие в компаунде полимерных групп  $\text{SH}$  и  $\text{SH}_2$  позволяет предполагать, что силы адгезии будут вызваны прежде всего первыми двумя сочетаниями. Когда субстратом является стеклотекстолит, стеклоткань или другие стеклянные материалы, могут образовываться химические связи. Являясь интенсивным адсорбентом эпоксисоединений, стекло ориентирует молекулы эпоксигрупп по направлению к своей поверхности. Эти материалы могут присоединять к себе эпоксисоединения или вызывать полимеризацию смолы в близлежащих слоях [26]. Ориентированная жесткая пограничная пленка не участвует в отверждении жидкой фракции. Ее плотность выше плотности отвержденной смолы.

При ориентационном взаимодействии силы притяжения будут в основном проявляться при остывании компаунда, так как тепловое движение молекул существенно уменьшает возможность их ориентации.

При контакте с неполярным веществом, когда преобладает индуктивный механизм взаимодействия, согласно работам Дебая температура не сказывается и средняя энергия взаимодействия дипольной и нейтральной молекулы определяется дипольным моментом молекул и их поляризуемостью. Энергия взаимодействия будет увеличиваться с ростом поляризуемости молекул.

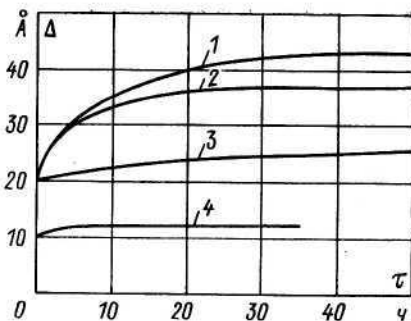


Рис. 4.11. Зависимости толщины оксидной пленки от продолжительности нахождения в воздухе при  $20^\circ \text{C}$   
1 — медь; 2 — железо; 3 — алюминий; 4 — серебро

Межмолекулярное взаимодействие может быть усилено за счет диффузионной способности компаунда. Продиффундировавшие в поверхностный слой субстрата концевые сегменты макромолекул компаунда удерживаются межмолекулярными силами. Доля диффузионного механизма зависит от химической природы материалов и физического состояния адгезива, его температуры и времени контакта.

Увеличение площади фактического контакта (активной площади) между компаундом и субстратом приводит к повышенной адгезии независимо от того, какими силами обусловлена связь между контактирующими материалами. Размер активной площади будет зависеть от способа обработки поверхности и определится показателем доступности (произведение амплитуды иглы профилографа на число колебаний). Так, для медной фольги показатель доступности при шлифовке равен 5,6, химическом травлении — 12,1, обработке металлической щеткой — 35,2, а при пескоструйной обработке — 90,4.

На размер активной площади влияют угол смачивания, способность адгезива заполнять неровности поверхности, т. е. его вязкость, способность вытеснять воздух, Пузырьки воздуха, находящиеся в глубоких бороздках и порах поверхности субстрата препятствуют достижению контакта.

С момента возникновения контакта адгезива с поверхностью детали или материала до начала процесса сшивки краевой угол смачивания должен стремиться к нулю, с тем чтобы обеспечить свободное затекание жидкости в поры или капилляры.

Отмечается также влияние толщины адгезионного слоя на его прочность.

Повышение прочности склеивания при уменьшении толщины клеевой прослойки можно объяснить следующими причинами:

1) ориентирующим влиянием твердой поверхности, так как интенсивность ориентационных сил обратно пропорциональна расстоянию от субстрата, а проявление ее увеличивается с уменьшением толщины клеевой пленки;

2) влиянием масштабного фактора, поскольку с увеличением толщины адгезионного слоя возрастает вероятность существования в нем неоднородностей и опасных дефектов;

3) ростом остаточных напряжений с повышением толщины адгезионного слоя.

В реальных залитых, запрессованных и армированных другим способом конструкциях адгезия компаунда или другого полимера с поверхностью деталей происходит в толстых слоях.

Испытание адгезии для толстых слоев эпоксидного компаунда производилось на лопатках, образованных посредством заливок полулопаток из различных материалов-субстратов.

Разрушающее напряжение при растяжении определялось по формуле  $\sigma_a = P/(S)$ , где  $P$  — разрывная нагрузка;  $S$  — площадь склеивания.

Результаты испытаний, приведенные в табл. 4.12, свидетельствуют о наличии зависимости адгезии от ТКЛР субстрата, т. е. зависимости от остаточных напряжений, возникающих при изготовлении образцов.

Таблица 4.12

Материал	ТКЛР, $\times 10^{-6}$ , К-1	Временное сопротивление на растяжение, МПа	Среднее квадратическое отклонение, МПа
Сталь	10...12	22,3	7,45
Медь	16,5	28,0	14,7
Стеклотекстолит	16,0	31,6	15,3
Латунь	13,0	33,4	11,2
Дюралюминий марки АМГ	23,0	31,0	12,2
Текстолит-А	35,0	36,0	8,7
Гегинакс	24,0	32,5	10,8
Эпоксидный компаунд ЭЗК-31 (отвержденный)	32,5	59,2	21,2

Из данных табл. 4.12 можно сделать вывод, что помимо силового поля субстрата и внутренних механических напряжений в компаунде на окончательную величину адгезии оказывают влияние другие факторы:

1) для дюралюминия — интенсивность образования оксидной пленки;

2) для текстолита — повышенная активная площадь склеивания, которая возникла за счет ворсинок хлопчатобумажной основы материала;

3) для стеклотекстолита — дополнительные химические связи с адгезивом и т. д.

Исследование адгезионного слоя под микроскопом показало наличие большого количества неоднородностей. Причиной их возникновения является следующее:

1) неравномерное перемешивание наполнителя компаунда (ПКП);

2) оседание наполнителя на торцевую (контактную) часть полулопатки, которая выполнена из материала-субстрата;

3) фильтрация жидкой фракции компаунда в слоистый материал-субстрат;

4) наличие воздушных включений, частичек пыли и других инородных макровключений, которые нарушают однородность адгезионного слоя и являются концентраторами внутренних механических напряжений.

В результате указанных явлений образуются несовершенные структурные соединения, ослабляющие процесс сцепления адгезива с субстратом.

Поверхность разрыва в большинстве случаев проходит вблизи адгезионного слоя, что свидетельствует о возникновении макси-



мальных неоднородностей и внутренних механических напряжений в граничном с адгезионным слое.

Наиболее стабильные и высокие значения адгезии компаунд имеет с текстолитом, ТКЛР которого наиболее близок по значению ТКЛР компаунда. Влияние ТКЛР субстрата на адгезионную прочность компаунда в толстых слоях обнаруживается при построении зависимости  $\sigma_a = f(\alpha)$ .

Большой разброс значений адгезионной прочности является характерным для процессов склеивания и объясняется большой зависимостью от технологических и рецептурных факторов. В залитых реальных изделиях, в которых площадь адгезии значительно больше, чем в экспериментальных образцах, технологические факторы оказывают несколько меньшее влияние. Кроме того, некоторые участки полимерной изоляции работают на сжатие, что увеличивает прочность адгезии.

При использовании в залитых конструкциях деталей из отвержденного компаунда (каркасы, прокладки, вкладыши) или применений многократных последовательных заливок возникают аутогезионные слои.

В этих случаях отрицательное значение приобретает наличие на поверхности ранее отвержденной детали ориентированной структуры компаунда, что затрудняет ориентационное взаимодействие молекул. Кроме того, структурообразованию препятствует наличие на отвержденной поверхности глянцевого гидрофобного слоя, ухудшающего условия смачивания жидким адгезивом и уменьшающего величину истинной площади контакта.

Способ обработки поверхности первичной заливки или деталей из отвержденного эпоксидного компаунда влияет на качество сцепления и величину адгезии.

Временное сопротивление на растяжение при пескоструйной обработке поверхности составляет 59,0 МПа, при обработке стеклянкой шкуркой — 45,0 МПа, необработанная поверхность со следами СКТ — 10,0 МПа с отклонением на  $\pm 50\%$ .

Из этих данных видно, что большие значения получены при пескоструйной обработке. Лучшие результаты достигнуты вследствие более глубокого разрушения поверхностной фазы компаунда и более тщательного удаления слоя ориентированной структуры, чем при использовании для обработки поверхности стеклянкой шкурки.

Несколько худшие значения  $\sigma_a$  имеют место при дробеструйной обработке, чем при пескоструйной.

Сравнение условий сцепления со свежееотвержденными образцами и деталями, отверждаемыми в течение 7—10 сут. до вторичной заливки, показало, что величина аутогезии для последних была на 20...30% меньше.

Можно сделать вывод, что в первом случае на поверхности детали-субстрата процесс полимеризации не был закончен и

подвижность высокомолекулярных цепей была достаточно высока, чтобы помимо силового поля поверхности действовали и другие связи. Это способствовало достижению высоких значений аутогезионной прочности.

При более длительном сроке хранения отвержденных деталей, предназначенных для вторичной заливки, увеличивается вероятность загрязнения.

Аналогичные условия имеют место при двукратных (многократных) заливках катушек или применении предварительно отвержденных деталей из эпоксидного компаунда. Полученные результаты позволяют говорить о возможности образования дислокаций и концентраторов напряжений, а также неоднородностей структуры не только непосредственно в аутогезионном слое, но и на близлежащих от него участках.

При длительном взаимодействии последовательных заливок с течением времени в граничном слое происходят еще более существенные структурные изменения.

Например, вокруг центрирующих прокладок из эпоксидных компаундов наблюдается образование значительной разделительной зоны с увеличенным процентным содержанием ПКП. Твердость этой зоны по Бринеллю была на 10...15% выше, чем на других участках эпоксидной изоляции.

Наличие такой зоны можно объяснить более интенсивным воздействием электрического, теплового и механического полей на неоднородные структуры граничных слоев компаунда, в частности процессами разложения молекул связующего полимера. Частичные разряды, более высокая температура и возникновение локальных механических напряжений приводят к ускоренному процессу старения полимерной изоляции на граничных с аутогезионным слоем участках и, как правило, к преждевременному выходу изделия из строя.

Аутогезионный слой, так же как и адгезионный, имеет меньшую электрическую прочность, чем прочность монолитного компаунда.

Приведенные данные по механической и электрической прочности эпоксидной изоляции адгезионных и аутоадгезионных слоев имеют важное значение для проектирования высоковольтных конструкций.

Релаксация и процессы старения адгезионных и аутогезионных слоев протекают аналогично тому, как это происходит в монолитном компаунде, содержащем инородные включения.

В некоторых работах показана целесообразность использования для улучшения адгезии магнитных и электрических полей, обработки ультразвуком, радиацией и ускоренными электронами. Так, при обработке ультразвуком поверхности стали 30, латуни Л63, сплава АМГ и сплава титана уголь смачивания уменьшается почти в 2 раза. Причем продолжительность облучения более 0,5 ч не улучшает угла смачивания.

Процессы старения адгезионных соединений в толстых (не пленочных) слоях полимеров не отличаются от явлений, имеющих место при старении самого материала-адгезива.

Технологические способы повышения адгезионной прочности: увеличение активной площади адгезии (создание шероховатости);

исключение с поверхности материала-субстрата гидрофобных, гладких и полированных поверхностей;

использование в качестве адгезива пары материалов с близкими или равными значениями  $\alpha$ , модуля Юнга и коэффициента Пуассона;

обезжиривание поверхности армирующих деталей перед заливкой;

нанесение промежуточных подложек, имеющих среднее между ТКЛР субстрата и адгезива значение;

использование конструктивных приемов путем придания формы и места размещения арматуры в полимерном материале, обеспечивающих обжатие за счет усадочных явлений.

Для полиолефинов, фторопластов и других неполярных материалов, обладающих слабой адгезией и требующих специальной предварительной обработки адгезионной поверхности химическими или физическими методами, повышение прочности адгезии достигается, главным образом, конструктивными приемами.

Неразъемное соединение полимерной прессованной изоляционной конструкции может быть осуществлено при следующих условиях:

максимальном увеличении поверхности соприкосновения арматуры с полимером;

увеличении активной площади адгезии и конструктивном обеспечении механической прочности на растяжение и кручение посредством сетчатой или прямой накатки с кольцевыми канавками. Накатку не доводят до края. Канавка должна иметь максимально возможную ширину.

Шаг накатки в зависимости от диаметра определяется из таблицы:

Диаметр накатываемой части арматуры, мм . . . . .	28	8...16	16...32	32...64	> 64
Шаг накатки, мм . . . . .	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0

Глубина канавки определяется из соотношения  $d = 0,75D$ , где  $d$  — диаметр канавки;  $D$  — диаметр арматуры.

Саму канавку располагают посередине запрессовываемой части арматуры, чем достигается большая степень релаксации внутренних напряжений вследствие возникшей разнотолщинности:

закрепления трубчатой арматуры в полимере за счет расплющенных, отбортованных, пуклеванных или выступающих кольцевых участков;

наличия на проволочной арматуре распрессованных участков, буртиков, изгиба проволоки и т. п.;

применения для плоских запрессованных участков арматуры различной формы отверстий.

## **ГЛАВА ПЯТАЯ**

### **ТЕРМОУПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТЕРМОУПРУГИЙ ПРОБОЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

#### **5.1. ОБРАЗОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ИЗОЛЯЦИИ**

Надежность изоляционных конструкций (ИК) в условиях эксплуатации, хранения, транспортировки, а также качество их в процессе изготовления во многом зависят от прочностных свойств и способности твердой изоляции противостоять не только внешним, но и внутренним механическим напряжениям.

Внутренние напряжения возникают уже в процессе изготовления после полимеризации при остывании полимерной изоляции ниже температуры стеклования, в период перехода из высокоэластического в упругое состояние. В керамике такие напряжения имеют место вследствие ее многофазности (кристаллической и стекловидной).

В стеклообразном состоянии полимеры из-за ограниченной возможности перемещения частей молекул деформации имеют упругий характер, т. е. мгновенно следуют за напряжением. Упругие деформации вызываются изменением межатомных состояний.

Высокоэластическое состояние возникает при интенсивных колебаниях свободных частиц цепочки молекул полимера, вращающихся вокруг своих осей, и характеризуется значительными релаксационными процессами.

Внутренние напряжения при этом имеют небольшие значения: они примерно на два порядка меньше, чем в стеклообразном состоянии. Практически можно считать, что напряжения возникают при температуре стеклования и растут линейно с уменьшением температуры.

Существующая в литературе информация о физико-механических свойствах эпоксидных компанудов и других полимеров (ударная вязкость, предел прочности и модуль упругости при сжатии, предел прочности при срезе и др.) не дает представления о процессах, возникающих в реальных конструкциях, и не позволяет использовать эти данные для проектирования твердой изоляции.

Такая изоляция в изделиях работает, как правило, в условиях двухосного растяжения. В редких случаях появляются на-

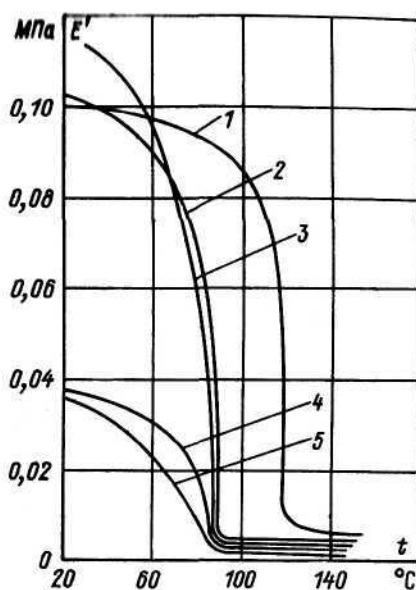


Рис. 5.1. Зависимости модуля упругости от температуры для различных марок компаундов  
 1 — ЭЗК-10; 2 — ЭЗЛ-120; 3 — ЭЗК-31; 4 — ЭПК-1; 5 — ЭП6-80

разца под действием нагружения. Кривые ползучести дают значительно меньше информации для проектирования изделий, чем ТРХ.

Все эти параметры характеризуют термоупругие напряжения, т. е. термоупругие свойства твердой изоляции. Термоупругие свойства зависят также от температуры, скорости и продолжительности нагружения.

Зависимость модуля упругости от температуры хорошо прослеживается на кривых рис. 5.1.

Выше температуры стеклования значение модуля мало изменяется. При более низких, чем  $t_c$ , положительных температурах его значение возрастает на порядок. Предельные значения модуль имеет при температуре около  $-60^\circ\text{C}$ , когда максимально возрастает плотность сшивки, т. е. уменьшается расстояние между реакционноспособными участками.

Модуль упругости эпоксидного компаунда зависит от рецептурно-технологических факторов: марки смолы и отвердителя, наличия пластификаторов или модификаторов, от тщательности перемешивания и вакуумирования, режимов полимеризации, охлаждения и др.

Значение модуля упругости существенно зависит от типа

пряжения сжатия. Значения их по сравнению с напряжением растяжения малы. Учитывая одновременно, что временное сопротивление на сжатие превосходит в 1,5...2 раза временное сопротивление на растяжение, напряжением сжатия в реальных конструкциях в большинстве случаев пренебрегают.

К. Н. Кан с сотрудниками [20] предлагает перечень основных характеристик, необходимых при рассмотрении механических процессов в эпоксидной изоляции: температура стеклования  $t_c$ , модуль упругости  $E'$ , коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона)  $\mu$ , температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР)  $\alpha$ , терморелаксационная характеристика (ТРХ) и кривые ползучести, т. е. кривые скорости линейных изменений об-

наполнителя и его процентного состава в объеме компаунда. Влияние наполнителя обусловлено частичным заполнением объема жесткими, малоподвижными включениями.

Некоторые авторы [26] рассматривают повышение жесткости компаунда и температуры стеклования с ростом процентного состава наполнителя как следствие образования в адсорбционном слое наполнителя жесткой пограничной пленки компаунда. Молекулы, находящиеся в адсорбционном слое, вступают в химическую реакцию с наполнителем и не могут участвовать в реакции отверждения.

С увеличением процентного состава наполнителя модуль упругости компаунда ЭЗК-31 возрастает в 2...3 раза по сравнению с ненаполненным составом:

Модуль упругости $E'$ , МПа . . . . .	0,04	0,053	0,08	0,120
Массовая доля наполнителя, % . . . . .	50	100	150	200

Приводимые данные, а также рис. 5.1 получены по методике К. Н. Кана в результате статистической обработки значений модуля упругости больших партий образцов. Границы доверительного интервала полученных значений  $\Delta E' = 0,003 \dots 0,004$  МПа.

Коэффициент Пуассона независимо от температуры и технологии практически остается неизменным и составляет 0,33 — для компаундов на основе смолы ЭДЛ (ЭЗК-10 и ЭЗЛ-120) и 0,30 — для компаундов на основе смолы ЭД-6 (ЭПК-1 и ЭЗК-31).

В катушках трансформаторов и дросселей для заполнения свободного пространства между проводами обмотки, между слоями и для пропитки волокнистой изоляции используют пропиточные компаунды типа ЭПК-1, ЭП-6-80 и др. Значение модуля упругости этих компаундов при температуре ниже  $80^\circ\text{C}$  в 3 раза меньше соответствующих значений жестких заливочных компаундов (рис. 5.1). Благодаря пропиточным компаундам обмотки приобретают большую податливость при возникновении напряжений по сравнению с участками, заполненными заливочным составом.

Исследованы значения модуля упругости и коэффициента Пуассона волокнисто-эпоксидной изоляции, пропитанной компаундом типа ЭПК-1. Образцы имели форму лопаток (ГОСТ

Таблица 5.1

Характеристика	Значение характеристики различных материалов				
	Бумага ЭИП-63	Картон переплетный	Бумага слюдинитовая	Стеклоткань	Лента батистовая
Модуль упругости, МПа	0,12	0,07	0,35	0,20	0,12
Коэффициент Пуассона	0,36	0,26	0,28	0,30	0,3



9550—81). Испытуемый материал укладывался послойно до плотного заполнения формы. Результаты экспериментов приведены в табл. 5.1. Из таблицы видно, что наибольшие значения модуля упругости характерны для материалов на основе слюды и стеклоткани.

Различие модуля упругости пропитанной бумаги ЭИП-63А и переплетного картона можно объяснить более высокой удельной плотностью бумаги и соответственно меньшим проникновением в нее пропиточного компаунда. Несомненно, оказала влияние также более высокая по сравнению с переплетным картоном адгезионная прочность между отдельными слоями бумаги, из которых состоял образец и, следовательно, большая его монолитность.

Под действием теплоты увеличивается амплитуда колебаний цепей и надмолекулярных структур компаунда. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), который характеризует это увеличение, не является величиной постоянной и повышается с ростом температуры.

Чем больше разность ТКЛР компаунда и заливаемых материалов при прочих равных условиях, тем большие напряжения следует ожидать в эпоксидной изоляции. Значение ТКЛР для ненаполненных компаундов —  $(60 \dots 70) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  — в 2,6 раза превосходит ТКЛР заливаемых материалов, таких, как медь, сталь, гетинакс и т. п.

Для снижения ТКЛР применяют наполнители, которые одновременно увеличивают теплопроводность компаундов. Благодаря этому возрастает удельная теплоотдача с поверхности изделия и достигается снижение его габаритов. Увеличение теплопроводности компаунда способствует уменьшению градиентов температурного поля во внутренних слоях изоляции относительно наружных и снижению внутренних механических напряжений. Возможен также переход на использование трубчатых тонкостенных конструкций.

При взаимодействии эпоксидной смолы с наполнителем вследствие резкого ограничения подвижности молекул существенно изменяются физико-механические свойства компаунда и в том числе его ТКЛР.

Выбор типа наполнителя производят с учетом объемного эффекта, сущность которого заключается в том, что повышение теплопроводности и снижение ТКЛР компаунда при одинаковых гранулометрических составах наполнителя в большей мере зависит от объема наполнителя, чем от природы материала.

Предельная объемная концентрация наполнителя определяется технологией, например допустимой вязкостью компаунда и сроком его жизни. Для наполнителя эти качества связаны с его гранулометрическим составом и способностью к смачиваемости частиц.

Большое влияние на качество изделия оказывает оседае-

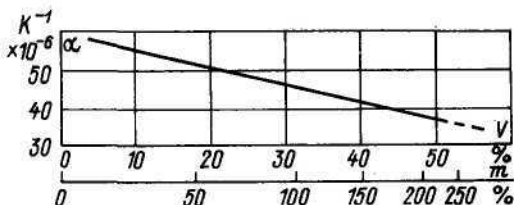


Рис. 5.2. Зависимость ТКЛР композита марки ЭЗК-31 от количества пылевидного кварцевого песка

мость частиц, которая происходит в заливке до начала процесса полимеризации и зависит от гранулометрического состава наполнителя. При одном и том же типе наполнителя из-за нестабильности его гранулометрического состава в состоянии поставки возможны различия упругих и прочностных характеристик композита. Увеличение процентного состава мелкой фракции снижает подвижность цепей связующего материала и приводит к увеличению модуля упругости и уменьшению ТКЛР. Неоднородность наполнителя приводит к повышению неоднородности структуры композита, возрастанию оседаемости крупных частиц наполнителя и образованию в объеме концентраторов напряжения.

На рис. 5.2 представлена зависимость ТКЛР от содержания пылевидного кварцевого наполнителя. Прямолинейный характер зависимости свидетельствует о пропорциональном влиянии на ТКЛР композита объемного содержания ПКП с низким значением ТКЛР.

Из рис. 5.3 следует, что зависимость ТКЛР от температуры больше проявляется в области, которая лежит выше значений температуры стеклования. Также видно, что температурные кривые в зависимости от типа смолы и отвердителя особенно сильно различаются между собой в области высокоэластического состояния.

Варьируя тип и процентный состав наполнителя, марки смолы и отвердителя можно подбирать необходимые значения

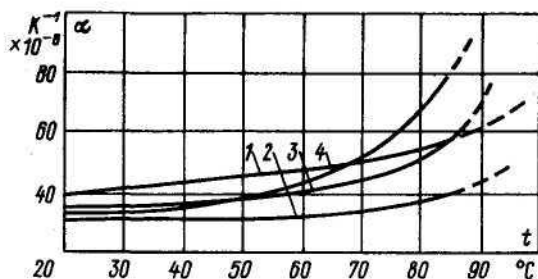


Рис. 5.3. Зависимости ТКЛР композитов от температуры для различных марок композитов

1 — ЭЗК-31; 2 — ЭЗЛ-120; 3 — ЭЗК-20; 4 — ЭЗК-10

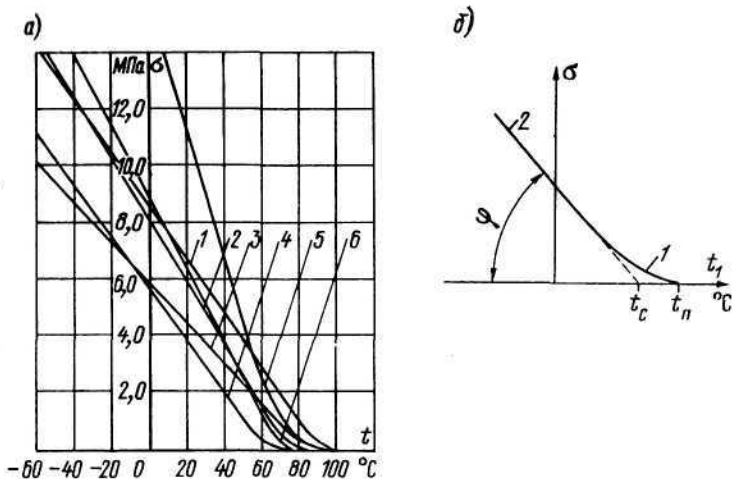


Рис. 5.4. Терморелаксационные (а) и типичная (б) характеристики компаундов

1 — ЭЗК-10+МА, 2 — ЭЗК-10+МТГФА, 3 — ЭЗК-31+МА, 4 — ЭЗК-31+МТГФА, 5 — ЭЗК-1, 6 — ЭЗК-31 (ЭДП)+МА-а; 1 — основная кривая, 2 — определение точки перегиба — б

ТКЛР, модуля упругости и коэффициента Пуассона или добиваться стабильных их значений при поставке исходных материалов с большим разбросом характеристик. Одновременно учитывается влияние указанных факторов на электрические и физико-механические свойства компаунда.

Наиболее полное представление о деформационных свойствах эпоксидных компаундов дают терморелаксационные характеристики (ТРХ). Они определяют зависимость внутренних механических напряжений от температуры. Эти напряжения возникают в компаунде в процессе полимеризации и остывания.

Характеристики снимаются на специальном приборе — терморелаксметре, на котором определяется напряжение при взаимодействии компаунда с залитым в него материалом, например медью. Показания прибора зависят также от отношения между площадями сечения компаунда и материала, из которого выполнен прибор.

Важным свойством ТРХ является большая чувствительность к влиянию состава компаунда на его термоупругие свойства (рис. 5.4, а). Из рисунка видно, что только переход от использования смолы ЭД-6 к смоле ЭДП-1 при прочих равных рецептурно-технологических условиях резко ухудшает эти характеристики и температуру стеклования.

Пользуясь ТРХ компаунда, получают следующие данные, которые можно использовать в процессе отработки технологии и при конструировании:

1) подбирают рецептуру и технологию, обеспечивающие образование минимальных напряжений для заданной температурной области. Чем больше угол наклона на участке ниже температуры стеклования, тем большую склонность к образованию остаточных напряжений имеет исследуемый компаунд.

2) определяют температуру стеклования компаунда, которая находится как точка пересечения продолжения прямолинейного участка ТРХ до пересечения с осью температуры.

3) выбирают наиболее эффективный материал для создания буфера между компаундом и обмоткой.

Терморелаксационные характеристики учитывают не только напряжения, возникающие в результате разности ТКЛР компаунда и залитого материала, но и усадочные напряжения при полимеризации и образовании шитой структуры полимера.

Эти остаточные напряжения вследствие релаксационных процессов составляют не более 1% суммарных напряжений в изоляции.

В некоторых исследованиях усадочные напряжения во время отверждения совершенно не наблюдались, что, очевидно, связано с погрешностями измерения.

Внутренние механические (термоупругие) напряжения образуются вследствие взаимодействия монолитной эпоксидной или вообще полимерной или керамической конструкции и деталей из материалов с ТКЛР, отличающимися от соответствующих коэффициентов твердого диэлектрика, а также за счет градиентов температурного поля в толстых слоях изоляции или слоях разной толщины (разнотолщинность).

В первом случае жесткие детали, монолитно связанные с изоляцией, препятствуют свободному изменению его размеров при колебаниях температуры.

Образование деформаций и затем напряжений вследствие наличия перепада температур по слоям, например, компаунда вызвано зависимостью его ТКЛР от температуры.

Все эти напряжения названы термоупругими. Напряжения в эпоксидной изоляции образуются в процессе изготовления изделия при охлаждении от температуры стеклования ( $t_c = 75 \dots 100^\circ \text{C}$ ) до температуры окружающей среды и во время эксплуатации, когда температура может изменяться в пределах от  $-60$  до  $+105 \dots 135^\circ \text{C}$ .

Рост термоупругих напряжений при охлаждении компаунда показан на рис. 5.4, а.

Интенсивный разогрев изоляции возможен под действием джоулевых потерь, при включении холодной обмотки трансформатора или дросселя на нагрузку, в момент короткого замыкания в обмотке или за счет диэлектрических потерь на высоких частотах, когда происходит быстрый разогрев твердых диэлектриков.

Нарушение теплового равновесия и появление термоупругих

напряжений возможны также на участках изоляции с резким изменением формы изделия и толщины изоляции или на больших площадках с тонким слоем одинаковой толщины при отслоении от залитой детали. Процесс остывания (или нагревания) происходит в тонких и толстых слоях изоляции неравномерно, особенно если источник изменения температуры находится внутри конструкции. Вследствие разности температур и образовавшейся деформации в каждом из слоев возникает результирующее напряжение на переходном по толщине участке изоляции.

Термоупругие напряжения могут усиливаться локальными концентраторами напряжений: углами, ребрами и выступами с меньшими радиусами кривизны, порами и макротрещинами, скоплениями ПКП и т. п.

Термоупругие напряжения, возникшие из-за разности ТКЛР материалов и вследствие неравномерного нагревания (охлаждения) изоляции, взаимозависимы.

Теоретические исследования напряжений, появляющихся в эпоксидной изоляции изделий производились в работах [27, 28]. Приведенные в этих работах положения могут быть использованы только для конкретных конструкций, но не дают возможности произвести полный анализ явлений, происходящих при термоупругих напряжениях. В них не учитывается влияние заполнения объема залитого изделия материалами с разными значениями ТКЛР, не принимается во внимание действие упругих постоянных материалов, игнорируются наличия участков с резкими изменениями геометрии компаунда, отсутствует учет релаксационных явлений в вязкоупругом состоянии изоляции.

В работе [20] приводится расчет термоупругих напряжений в эпоксидной изоляции с учетом указанных факторов для катушек цилиндрической формы.

Анализ термоупругих напряжений в катушках трансформаторов прямоугольной формы дается в работе [29]. Катушка рассматривается по плоскостям симметрии как многослойная плоская стенка, состоящая из двух материалов. Влияние концов стенки не учитывается. Материалы, составляющие стенку, связаны между собой монолитно без трещин и отслоений. Появление термоупругих напряжений исследуется при охлаждении катушки после полимеризации ниже температуры  $t_c$ , когда компаунд находится в вязкоупругом состоянии.

Среднее значение ТКЛР компаунда  $\alpha_k$  в интервале от температуры стеклования  $t_c$  до температуры окружающей среды  $t_0$  определяется из уравнения

$$\alpha_{k, \text{cp}} = (1/l) [\Delta l(\Delta t)],$$

где  $\Delta l$  — изменение длины при охлаждении от  $t_c$  до  $t_0$ .

Зависимость модуля упругости от температуры также учиты-

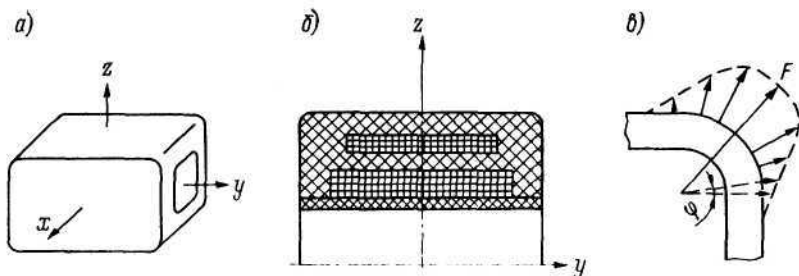


Рис. 5.5. Общий вид (а), сечение (б) и схема распределения растягивающих усилий на угле (в) катушки трансформатора

вается посредством определения его среднего значения в исследуемом температурном интервале.

В процессе остывания размеры обмотки и компаунда будут уменьшаться. Из-за разности ТКЛР ( $\alpha_k > \alpha_m$ ) между ними появится натяг, который компенсируется механическими деформациями в изоляции и обмотке. В результате термоупругие напряжения в компаунде будут растягивающими, а в медной обмотке — сжимающими. Учитывая, что временное сопротивление компаунда на растяжение значительно меньше предела прочности на сжатие, в данном случае рассматривается наиболее опасный случай возможных напряжений.

Термоупругие напряжения в компаунде являются следствием действия растягивающей силы  $F_k$ , направленной по оси  $x$ , а в медной обмотке — сжимающей силы  $F_m$  (рис. 5.5). Вследствие монолитности конструкции

$$F_k = -F_m \quad (5.1)$$

или

$$\sigma_{x_k} S_k + \sigma_{x_m} S_m = 0, \quad (5.2)$$

где  $\sigma_{x_k}$  и  $\sigma_{x_m}$  — термоупругие напряжения компаунда и меди;  $S_k$  и  $S_m$  — площади поперечного сечения эпоксидного компаунда и меди.

Термоупругие напряжения можно выразить через упругие постоянные и относительные деформации:

$$\begin{aligned} \sigma_{x_k} &= [E'_k / (1 - \mu_k)] e_k; \\ \sigma_{x_m} &= [E'_m / (1 - \mu_m)] e_m, \end{aligned} \quad (5.3)$$

где  $E'_k$  и  $E'_m$  — модули упругости;  $\mu_k$  и  $\mu_m$  — коэффициенты Пуассона;  $e_k$  и  $e_m$  — относительные деформации (все обозначения с индексом «к» относятся к компаунду, а с индексом «м» — к меди).

Учитывая, что результирующие относительные деформации эпоксидного компаунда и обмотки равны друг другу вследствие монолитности, т. е.



$$\dot{\epsilon}_m - \alpha_m \Delta t = \epsilon_k - \alpha_k \Delta t, \quad (5.4)$$

можно, решив систему уравнений (5.2), получить выражение для растягивающих термоупругих напряжений в компаунде

$$\sigma_k = \sigma_{xk} = \frac{(\alpha_k - \alpha_m) \Delta t}{1 + \frac{1 - \mu_m}{1 - \mu_k} \frac{E_k' S_k}{E_m' S_m}} \frac{E_k'}{1 - \mu_k} k_n, \quad (5.5)$$

где  $k_n$  — коэффициент, учитывающий особенности конструкции изделия.

Так как у эпоксидных компаундов и меди коэффициенты Пуассона примерно равны ( $\mu_k \approx \mu_m$ ), уравнение (5.5) можно привести к виду

$$\sigma_k = \frac{(\alpha_k - \alpha_m) \Delta t}{1 + (E_k'/E_m') [S/(S_m - 1)]} 1,47 E_k' k_n, \quad (5.6)$$

где  $S = S_k + S_m$  — площадь поперечного сечения катушки.

Выражением (5.6) определяются термоупругие напряжения при остывании катушки после полимеризации компаунда.

При включении трансформатора на нагрузку или при коротком замыкании происходит местный перегрев меди относительно компаунда, равный  $\Delta t_b$ , что вызывает дополнительные напряжения в компаунде. Учитывая быстрое протекание таких процессов, релаксационными явлениями в компаунде можно пренебречь. Результирующие термоупругие напряжения с учетом напряжений, возникающих во время эксплуатации трансформаторов, могут быть определены выражением

$$\sigma_{k,b} = \frac{(\alpha_k - \alpha_m) \Delta t + \alpha_m \Delta t_b}{1 + (E_k'/E_m') [S/(S_m - 1)]} 1,47 E_k' k_n. \quad (5.7)$$

Наиболее опасными участками изоляции являются углы внутреннего слоя катушки, где обычно и появляются первые трещины при охлаждении изделия. Разрушающие термоупругие напряжения возникают вследствие дополнительных растягивающих усилий на углах изоляции и углах обмотки. На углах обмотки такие напряжения возникают чаще, чем на прямолинейных участках, за счет деформаций при изгибе и более плотной намотки как результат большого удельного давления при укладке провода.

Для оценки напряжений в наиболее опасных участках на углах принимается упрощенная схема распределения усилий (рис. 5.5, *в*). Учитываются только растягивающие напряжения на углах без учета соседних участков. Неточности расчетной схемы идут в запас прочности [30]. Исходя из этого рисунка, можно записать

$$\sigma_{xk} \delta = r \int_0^{\pi/2} \sigma_y \cos \varphi d\varphi, \quad (5.8)$$

где  $\sigma_y$  — растягивающее напряжение в компаунде на углах за счет реакции от сил адгезии при монолитном состоянии ка-

тушки;  $\delta$  — толщина слоя компаунда в окне катушки;  $r$  — радиус кривизны на углах окна катушки.

Решение уравнения (5.8) дает следующую зависимость:

$$\sigma_y = \delta / r \sigma_{xk} \quad (5.9)$$

Так как  $\sigma_{xk} = \sigma_k$ , то напряжение на углах катушки после остывания ниже температуры стеклования определяется выражением

$$\sigma_y = \frac{(\alpha_k - \alpha_m) \Delta t}{1 + (E_k' / E_m') [S / (S_m - 1)]} \frac{\delta}{r} 1,47 E_k' k_n \quad (5.10)$$

Из уравнений (5.6), (5.7) и (5.10) следует, что термоупругие напряжения в эпоксидной изоляции зависят не только от перепада температур и разности значений ТКЛР компаунда и залитого в него материала. Существенное воздействие оказывает отношение модулей упругости и отношение площади поперечного сечения катушки к площади сечения материала. На углах катушки или на других участках со сложной геометрией дополнительное влияние на внутреннее напряжение в компаунде оказывает отношение толщины изоляции к ее радиусу кривизны.

Указанные уравнения удобны при сравнении и анализе характеристик конструкций из любых твердых диэлектриков с целью выбора оптимального холодоустойчивого варианта. Наличие концентраторов напряжения, изменение толщины слоя и другие факторы, влияющие на величину ТУН, учитываются коэффициентом  $k_n$ .

Из уравнений, в частности, следует, что отрицательное влияние на холодоустойчивость оказывает применение, например, в залитых катушках трансформаторов каркасов, центрирующих прокладок и других деталей из твердых материалов с отличиями от  $\alpha_k$ ,  $E_k'$  и  $\mu_k$  значениями.

Справедливость этого вывода подтверждается экспериментальным определением ТУН в трех основных типах катушек дросселя с одинаковым заполнением медью.

I тип — с каркасом из стеклопластика, ТКЛР которого в 3 раза меньше ТКЛР компаунда, а модуль упругости — в 4 раза больше;

II тип — каркас отсутствует и заменен центрирующими прокладками, изготовленными из заливочного компаунда;

III тип — без каркаса и без прокладок, катушка изготовлена однократной заливкой.

Результаты измерения напряжений при температуре 20°С, произведенных прямым тензометрическим методом с помощью гарируемых датчиков во время остывания катушек ниже температуры стеклования, приведены в табл. 5.2.

Из данных, приведенных в табл. 5.2, видно, что максимальные ТУН возникают в каркасной конструкции (тип I), которая имеет наибольшее заполнение объема катушки инородными

Таблица 5.2

Тип конструкции	Напряжение, МПа, слоя изоляции катушек				
	наружного				внутреннего (широкая сторона)
	у поверхности обмоток			у поверхности изоляции (широкая сторона)	
	широкая сторона	узкая сторона	углы		
I	23,4	27,5	28,4	18,0	26,4
II	14,1	20,0	23,1	11,5	23,0
III	13,8	19,2	20,2	11,0	—

твердыми материалами, затем следуют катушки с прокладками. Наименьшие напряжения — у катушек без каркасов и без прокладок (тип III). У всех трех типов на углах возникают наиболее опасные напряжения.

Влияние ТУН в первую очередь проявляется в наиболее ослабленных местах конструкций, которыми являются адгезионные слои. Образование трещин при охлаждении катушек ниже температуры 20° С наблюдаются в такой последовательности:

при —75° С — в катушках типа II вдоль прокладок;

при —80° С — в катушках типа I на углах по границе с каркасом;

при —90° С — в катушках типа III на углах внутреннего слоя изоляции.

Приведенные данные позволяют сделать следующие выводы:

1) причиной механического разрушения эпоксидной изоляции являются образующиеся в ней ТУН;

2) механизм образования ТУН связан с наличием в данном изделии жестких деталей, выполненных из материалов, значения ТКЛР, модулей упругости и коэффициентов Пуассона которых отличаются от соответствующих характеристик компаунда;

3) способность литого изделия противостоять ТУН зависит от когезионной и адгезионной прочности компаунда.

Все сказанное в равной мере относится к любым изоляционным конструкциям на основе твердых диэлектриков.

## 5.2. СНИЖЕНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Улучшение качества разработки изделий, залитых эпоксидным компаундом, связано со снижением термоупругих напряжений (ТУН) и может быть достигнуто тремя основными путями:

1) повышением однородности структуры изоляции в механическом отношении, что связано с применением жестких деталей из материалов с близкими или равными соответствующим характеристикам компаунда значениями ТКЛР, модуля упругости и коэффициента Пуассона (возможно и обратное решение за-

задачи, когда подбирают компаунд или другую изоляцию с близкими к характеристикам армированных материалов значениями указанных параметров);

2) уменьшением коэффициента заполнения объема изделия инородными твердыми материалами  $k_v$ , который определяется как отношение суммарного объема таких материалов  $V_m$  к общему объему изделия (катушки);

$$k_v = V_m/V_k; \quad (5.11)$$

3) уменьшением жесткости армированных в изделии деталей, изменением их формы, исключением концентраторов напряжений и другими конструктивными приемами.

Снижение ТУН посредством повышения однородности структуры литой изоляции связано с удовлетворением некоторых, иногда противоречивых, требований. Помимо значений ТКЛР, модуля упругости и коэффициента Пуассона учитываются адгезионные свойства полимера к залитым жестким материалам. Принимается во внимание также электрическая однородность твердых изоляционных материалов, определяемая разностью значений их диэлектрических проницаемостей относительно компаунда, что способствует изменению напряженности электрического поля на границе, образованию частичных разрядов и соответственно дополнительному локальному нагреву.

Значение ТУН зависит в равной мере от физико-механических свойств активных и конструкционных материалов изделия.

Гармоничное сочетание материалов иногда достигается использованием полимеров, характеристики которых приближаются или занимают промежуточное значение по своим физико-механическим свойствам относительно жестких материалов.

Выбор типа жесткого диэлектрика для каждой конструкции производится по критерию кратковременной и длительной работоспособности  $k_n$ , который учитывает температурный ход всех наиболее важных характеристик полимера и характеристик сочетающегося с ним твердого материала. Терморелаксационная характеристика для определения критерия работоспособности снимается с помощью прибора, имитирующего твердый материал, который занимает преобладающую часть объема изделия (§ 5.1).

Снижение ТУН посредством уменьшения коэффициента заполнения объема инородными твердыми материалами достигается за счет сокращения объема конструкционных материалов. Эта возможность позволяет сократить габариты изделия. Относительная величина активных материалов в изделии при этом может быть постоянной, и коэффициент заполнения объема изменяется незначительно или остается прежним.

Сокращение объема твердых изоляционных материалов для эпоксидных трансформаторов может быть достигнуто изменением их размеров или полным отказом от применения в катуш-

ках каркасов, прокладок и других деталей. Для решения этой задачи положительную роль может сыграть также уменьшение толщины каркасов. Применение тонкостенных каркасов одновременно повышает их способность к деформации.

Центрирующие прокладки с целью уменьшения их объема, а также для снижения местных напряжений изготавливают шаровидной или чечевицеобразной формы с максимальной активной площадью адгезии. Увеличение такой площади достигается приданием шероховатости, накаткой, канавками и т. п.

Разработаны способы центрирования и закрепления в заливочной форме обмоток подвеской их на специальной панели.

Панель прикрепляется к обмотке в таком месте, где термостойкие напряжения и напряженность электрического поля минимальны. Для панелей применяют материалы, имеющие хорошую адгезию к компаунду. Конструкция и место установки панели предусматривают возможность работы компаунда на сжатие относительно заливаемой детали. Такая конструкция с подвеской обмотки позволяет полностью отказаться от каркасов и прокладок.

Более простым способом, исключающим применение каркасов и прокладок, может служить использование волокнисто-эпоксидной изоляции. Обмотку укладывают на слой волокнистого материала, который пропитывается. Затем обмотка заливается и полимеризуется одновременно с главной изоляцией. Пропитанные волокнистые материалы имеют меньшую, чем литой компаунд, жесткость. Этим же целям снижения ТУН служит отказ от применения многократных последовательных заливок. Повторная полимеризация предварительно залитых слоев компаунда изменяет их упругие свойства вследствие увеличения плотности сшивки молекул полимера при повторной термообработке. Сама первично залитая обмотка имеет большую жесткость за счет армирования медью.

Сочетание двух указанных факторов позволяет рассматривать предварительно залитую обмотку как жесткую деталь, помещенную в объем вторичной заливки изделия.

Снижение ТУН в изоляции катушек эффективно осуществляется уменьшением жесткости обмоток. Для осуществления этого приема разработаны способы, включающие замену обмоточного провода большей площадью поперечного сечения несколькими параллельно намотанными проводами меньшей площади сечения; применение вместо сплошной рядовой намотки — секционной; увеличение межвитковой и межслоевой изоляции.

Этим же целям способствует использование для межслоевой изоляции материалов, которые после пропитки и полимеризации создают менее жесткие прослойки, чем заливочный компаунд. В качестве такой изоляции могут служить волокнистые или пленочные материалы, обладающие хорошей адгезией к компаунду.

Для пропитки обмоток применяют компаунды, значение модуля упругости которых в несколько раз меньше модуля заливочного материала, а усадка и ТКЛР имеют минимальные значения.

Уменьшение ТУН на углах прямоугольных катушек может быть получено увеличением в области минимального радиуса кривизны в 1,2...2 раза толщины межслоевой изоляции по сравнению с толщиной на прямолинейных участках. Тем самым из-за повышенного удельного давления провода на углах по всему периметру сохраняется одинаковая толщина межслоевой изоляции или она делается несколько толще на углах.

Повышение способности к деформации обмоток может быть получено нанесением на нее буферных слоев из волокнистых или пластичных материалов. Предпочтительно применение волокнистых материалов, которые не полностью пропитываются эпоксидным компаундом и деформация в которых при возникновении напряжений происходит за счет свободных пространств между волокнами и внутри них.

При использовании пластичных буферных материалов, деформация осуществляется за счет подвижности материала на молекулярном уровне.

На обмотку могут также наноситься материалы, препятствующие проникновению заливочного компаунда между витками и слоями. В отдельных случаях возможно применение обмоток без предварительной их пропитки. Такие конструкции обычно применяются для обмоток до 3 кВ и требуют экранирования, с тем, чтобы исключить влияние на них электрического поля большой напряженности.

Иногда обмотки пропитывают и заливают тонким слоем эластичного компаунда. Такой материал должен обладать химической совместимостью с заливочным жестким компаундом и не подвергаться значительным изменениям в процессе старения. Большинство эластичных компаундов не обладает такими качествами. На рис. 5.6 приведены значения модуля упругости и ТКЛР в зависимости от срока службы при повышенной температуре для эластичных компаундов на основе марки 30-429ДТФ.

Из рисунка видно, что эти характеристики с течением времени сильно изменяются относительно своего исходного состояния. Модуль упругости возрастает в 3...4 раза, а ТКЛР уменьшается почти в 2 раза.

Если принять во внимание действие механического нагружения и электрического поля, то ухудшение характеристик вследствие старения будет еще более значительным.

Уменьшение жесткости обмотки посредством нанесения на нее амортизационного слоя из эластичного компаунда требует изготовления специальных заливочных форм, дополнительных технологических циклов заливки и полимеризации и т. п. Все



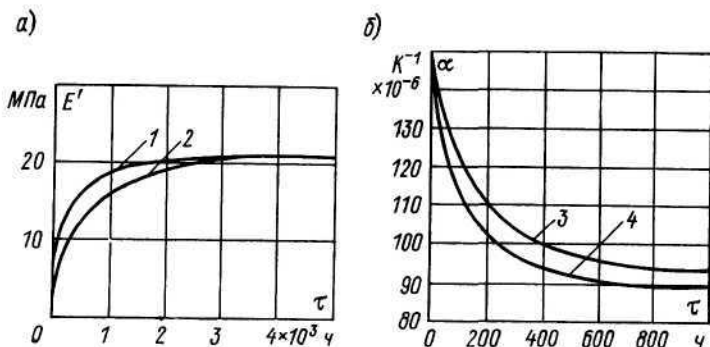


Рис. 5.6. Зависимости модуля упругости (а) и ТКЛР (б) эластичного компаунда марки 30-429ДФ от времени старения при различных температурах

1 — 120 °С; 2 — 85 °С; 3 — 85 °С; 4 — 100 °С

это делает применение такого способа весьма трудоемким.

Снижение ТУН достигают различными конструктивными способами:

а) жесткие каркасы делают с надрезами, что увеличивает их деформативную способность;

б) катушку делают круглой формы или при необходимости выполнения ее прямоугольной максимально увеличивают радиусы кривизны конструкции;

в) первой относительно магнитопровода размещают более жесткую обмотку, например намотанную проводом большей площади поперечного сечения, шинкой или фольгой.

Эффект снижения термоупругих напряжений в последнем случае объясняется тем, что возникающий при разной толщине наружного и внутреннего слоев изоляции изгибающий момент, равнодействующая которого направлена к оси катушки, будет принимать на себя более жесткая обмотка, а не изоляция по внутреннему окну катушки.

Использование перечисленных способов снижения ТУН позволяет в большинстве случаев создать необходимый запас прочности в эпоксидной изоляции трансформаторов и дросселей различных конструкций.

Снижение ТУН и повышение механической прочности изоляторов и других изоляционных конструкций из заливочных и прессованных полимерных материалов достигается применением электродов или армирующих элементов из металлических сеток, металлизированных деталей, выполненных из полимерного материала самого диэлектрика или из полупроводящего материала на основе полимерной матрицы. Подробнее данный вопрос рассматривается в гл. 6.

Перспективным является также метод замены в твердом диэлектрике массивных металлических электродов металлизиро-

ванными полостями, которым придается необходимая по конструктивным требованиям или по законам электростатики геометрия для выравнивания электрического поля.

### 5.3. ОБРАЗОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ ПРОБОВ В ИЗОЛЯЦИИ

Термоупругий пробой (ТУП) вызывается термоупругими напряжениями в керамике и в других твердых диэлектриках вследствие неравномерного разогрева диэлектрика в поле высокой частоты.

Растрескивание может явиться следствием ионизации газа в крупных порах, приводящей к дополнительному тепловыделению, а в плотной керамике с незначительными порами раскалывание связано с тепловыделением в твердой фазе. Опасные градиенты температурного поля возникают как в однородных, так и в неоднородных электрических полях.

Наиболее полная и сбалансированная теория нарушения сплошности твердых диэлектриков в высокочастотных электрических полях нашла свое отражение в докторской диссертации Ю. М. Волокабинского.

В зависимости от характеристик диэлектрика, частоты электрического поля и условий охлаждения раскалывание может происходить из-за появления разрушающего перепада температур в условиях теплового равновесия или при прогрессивном нагреве диэлектрика после нарушения теплового равновесия.

Для высокочастотных изоляционных конструкций наибольший интерес представляет расчет ТУП для керамических и стеклянных (ситалловых) стержней, трубок и сфер. Для полимерных высокочастотных материалов ПЭ, ПП, Ф-4 и т. п. вследствие малых диэлектрических потерь и значений модуля Юнга возможность появления ТУП крайне незначительна.

Расчеты раскалывающего напряжения (или напряженности) и появления разрушающего перепада температур рассматриваются без учета краевых эффектов для электрических полей, близких к равномерным. Последнее оправдывается нецелесообразностью по механическим и экономическим соображениям разработки изоляционных конструкций с резко неравномерным электрическим полем. При одинаковых габаритах и частоте наиболее высокие напряжения выдерживают конструкции с равномерным электрическим полем.

Важность определения ТУП для керамики связана как с определением ее кратковременной прочности, так и с ее старением на высоких частотах под воздействием процессов рекристаллизации и роста микротрещин. Внутренние механические напряжения увеличиваются по мере роста частоты и напряженности электрического поля из-за вызываемого им в теле изолятора перепада температур.

Для опорных и натяжных (антенных) стержневых изоляторов разрушение в равномерном электрическом поле без приложения внешней нагрузки произойдет при напряжении

$$U_p = 3,8 \cdot 10^2 l / R \sqrt{[k / (\epsilon \operatorname{tg} \delta f)] [(1 - \mu) \sigma_{\text{в}} / (\alpha E'_y)]},$$

где  $l$  и  $R$  — кратчайшее расстояние между электродами и радиус стержня;  $k$  — коэффициент теплопроводности диэлектрика;  $\epsilon$ ,  $\operatorname{tg} \delta$  и  $f$  — диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь и частота;  $E'_y$  — модуль Юнга;  $\alpha$  и  $\mu$  — ТКЛР и коэффициент Пуассона;  $\sigma_{\text{в}}$  — временное сопротивление на растяжение диэлектрика.

Когда к изолятору приложена растягивающая сила  $F$  или в процессе изготовления, хранения и транспортировки в теле изолятора возникают значительные внутренние напряжения, обусловленные осевым напряжением  $\sigma_0 = F / (\pi R^2)$ , условия напряжения раскалывания можно записать в виде

$$U_p = 3,8 \cdot 10^2 l / R \{ [k(1 - \mu) / (\epsilon \operatorname{tg} \delta \alpha f E'_y)] [\sigma_{\text{в}} - F / (\pi R^2)] \}^{1/2}$$

Силу, которая вызывает разрыв изолятора, находящегося в однородном электрическом поле  $E$ , можно определить из выражения

$$F = \pi R^2 \{ \sigma_{\text{в}} - [\epsilon \operatorname{tg} \delta f E^2 \alpha E'_y / [1,44 \cdot 10^{11} k(1 - \mu)]] \}.$$

Для диапазонов частот в десятки мегагерц, когда внутри стержневого изолятора условия охлаждения несоизмеримы с охлаждением внешних слоев, возникают чрезмерные перепады температур, приближающиеся к  $\Delta t_p$ . Более равномерные условия охлаждения внутренней и наружной поверхности возникают в трубчатых конструкциях, особенно с тонкими стенками. Применение трубок позволяет значительно сократить перепад температур и поднять значение частоты и напряжения высокочастотного изделия.

Рассмотрим предельные случаи, когда охлаждается только наружная поверхность изолятора или когда и внутренняя и внешняя. В последнем случае их температуры равны, а максимальная температура  $t_{\text{max}}$  будет внутри стенки изолятора на расстоянии  $r_m$  от его оси.

Наиболее распространенными на практике являются опорные и натяжные трубчатые изоляторы, у которых внутреннее отверстие закрыто арматурой и охлаждение происходит только через наружную поверхность.

Напряженность электрического поля, при которой происходит раскалывание опорного и натяжного трубчатого изоляторов без учета внешней нагрузки, будет

$$E_p = 3,8 \cdot 10^2 \left\{ \frac{1}{R^2 - 3r_0^2 + \frac{4r_0^4}{R^2 - r_0^2} \ln(R/r_0)} \frac{(1 - \mu) k \sigma_{\text{в}}}{\epsilon \operatorname{tg} \delta f \alpha E'_y} \right\}^{1/2},$$

где  $r_0$  — радиус внутреннего отверстия трубки.

Для расчета трубчатых изоляторов, охлаждаемых с внутренней и с наружной поверхностей, что возможно, например, для проходного изолятора, можно воспользоваться уравнением

$$E_p = 3,8 \cdot 10^2 \left\{ \frac{1}{R^2 + r_0^2 - \frac{R^2 - r_0^2}{\ln(R/r_0)}} \frac{k(1-\mu)\sigma_n}{\varepsilon \operatorname{tg} \delta f \alpha E_y} \right\}^{1/2}.$$

На основании приведенных уравнений рассчитаны и построены графоаналитические характеристики для трубчатых опорных и натяжных стеатитовых изоляторов, работающих в диапазоне, соответствующем мегагерцам (рис. 5.7).

Из рисунка следует, что с уменьшением толщины стенок стеатитовых трубок и соответственно со снижением разницы температуры между наружной и внутренней поверхностью трубок повышается раскалывающая напряженность или, что то же самое, при уменьшении толщины стенок можно повышать частоту.

Керамические стеатитовые изоляторы в форме сферы находят применение в качестве поворотных для высоковольтных высокочастотных вариометров контурных устройств. Такая форма способствует уменьшению высоты изоляторов и самого вариометра, а также обеспечивает необходимую механическую прочность при повороте массивного ротора.

Вследствие того что внутренние части шара более нагреты, чем наружные, в шаре возникают сжимающие радиальные ТУН. Этот процесс характерен также при изготовлении шаровых изоляторов. Из-за большого перепада температур внутри и снаружи шара при недостаточно медленном остывании возникают не только микротрещины, но и большие разломы.

Перепад температур в центре шара и на его поверхности, приводящий к раскалыванию, определяется уравнением

$$\Delta t_p = [1,25(1-\mu)/(1+\mu)] \times [\sigma_n/(\alpha G)],$$

где  $G$  — модуль сдвига.

Напряженность электрического поля при эксплуатации без учета внешних и технологических внутренних напряжений определяется для равно-

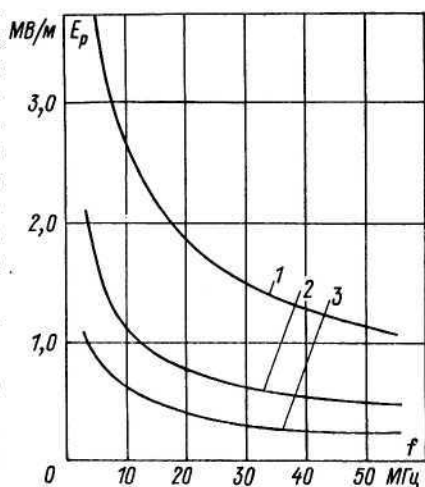


Рис. 5.7. Зависимости напряженности электрического поля раскалывания стеатитовых трубок от частоты при толщине стенок трубок диаметром 25 мм, равной 2 мм (кривая 1), 5 мм (кривая 2) и 10 мм — кривая 3

мерного электрического поля уравнением

$$E_p = 3,68 \cdot 10^5 / R \sqrt{[k / (\epsilon \operatorname{tg} \delta f)] [1 - \mu / (1 + \mu)] [\sigma_b / (\alpha G)]},$$

где  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  — значения при средней температуре, а  $G$  — модуль сдвига.

$$t_{cp} = t_n + 0,5 \{ [1 - \mu / (1 + \mu)] [\sigma_b / (\alpha G)] \},$$

где  $t_n$  — температура на поверхности шара.

Для выбора предпочтительной формы изолятора при одинаковом удельном тепловыделении, когда диаметр сферы равен диаметру стержня и толщине пластины, ТУН на поверхностях пластины, стержня и шара относятся как 40 : 15 : 8, а разрушающие перепады температур в пластине, стержне и шаре относятся как 3 : 4 : 5. Таким образом, наилучшие условия эксплуатации создаются в изоляторах в форме пластины и стержня, а наихудшие, естественно, — в форме шара.

Все уравнения выведены с указанными ранее допущениями и не учитывают такие особенности реальных изоляционных конструкций, как возможные изменения геометрии в виде полостей, ребер, разнотолщинностей, наличия металлической арматуры или конструктивных армирующих деталей, и т. п. Все это необходимо принимать во внимание при расчетах в процессе проектирования изоляционных конструкций.

Обычно такие характеристики определяются экспериментальным путем и в дальнейшем учитываются поправочными коэффициентами, которые вводятся в приведенные уравнения.

Другим существенным условием эксплуатации высокочастотных конструкций является нагрев в поле высокой частоты металлических элементов и деталей, монолитно связанных с телом изолятора. Нередко температурная доля такого нагрева оказывается настолько существенной, что приводит к локальным разрушениям изолятора, особенно по границе диэлектрика с этими деталями.

При работе изоляционной конструкции в высокочастотном поле, одновременно с диэлектрическими потерями в теле изолятора, в металлической арматуре возникают джоулевые потери, обусловленные емкостным током, сопротивление которому возрастает за счет эффекта вытеснения, а потери — за счет вихревых токов.

Глубину проникновения тока в металл при поверхностном эффекте можно определить по формуле

$$\delta = 0,5 \sqrt{\rho / (\mu_n f)},$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление металла;  $\mu_n$  — магнитная проницаемость;  $f$  — частота.

Распределение плотности тока может быть представлено в виде уравнения

$$j = [H/(2\sqrt{2\pi\delta})] \exp(-x/\delta),$$

где  $H$  — напряженность магнитного поля;  $\delta$  — глубина его проникновения.

Это уравнение применимо лишь в том случае, если поверхность, по которой идет ток, будет плоской или иметь кривизну весьма большого радиуса. При соотношении  $\delta \leq 0,25r_0$  уравнение для плотности тока будет иметь вид

$$j = \{[H/(2\sqrt{2\pi\delta})] (1/\sqrt{1-x/r_0})\} \exp(-x/\delta),$$

где  $x = r_0 - r$  — расстояние от оси, до которой проникает ток.

При относительно малых радиусах и  $\delta \geq 0,25r_0$  уравнение примет вид

$$j = [H/(4\pi\delta^2)]r.$$

Из приведенных уравнений следует, что при относительно больших частотах, а значит, малых глубинах проникновения, ток сосредоточивается вблизи поверхности и сравнительно мало зависит от радиуса кривизны. При относительно низких частотах зависимость плотности от кривизны весьма велика, так как ток спадает линейно с уменьшением радиуса кривизны.

Потери, вызываемые в металлической арматуре вихревыми токами, определяются уравнением

$$P_v = 1,33gk_\phi^2\delta^2f^2B_mV,$$

где  $g$  — удельная проводимость;  $k_\phi$  — коэффициент формы;  $B_m$  — индукция;  $\delta$  — толщина проводящей среды или глубина проникновения тока;  $f$  — частота;  $V$  — объем проводящей среды.

Проведенными экспериментами было подтверждено, что основная доля в нагревание арматуры вносится вихревыми токами в ее толще.

Для уменьшения влияния эффекта вихревых токов могут быть предложены следующие способы изготовления арматуры:

сваркой тонкостенной конструкции из двух половинок немагнитного материала;

штамповкой из изолированного друг от друга тонколистового немагнитного материала с высокой проводимостью;

прессованием из высокочастотного полимерного материала с последующим серебрением на толщину электромагнитной проницаемости для данной частоты;

прессованием из высокочастотных ферритов с малыми потерями на вихревые токи.

Наиболее часто употребляемые и простые в технологическом отношении способы связаны с применением материалов, обладающих высокой проводимостью, или серебрением поверхности арматуры.



## КОНСТРУКЦИИ С ВЫРАВНЕННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

## 6.1. ВЫРАВНИВАНИЕ ПОЛЕЙ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

Как было показано в § 2.2, срок службы эпоксидной, да и другой твердой изоляции с  $k_n \leq 3 \dots 4$  увеличивается, при прочих условиях, по сравнению с  $k_n > 4$ , на 1—2 порядка.

Рациональное использование диэлектрика, снижение массогабаритных характеристик изоляционных конструкций и повышение их надежности связаны с обеспечением равномерного или близкого к равномерному электрического поля во всем объеме изоляции. При удовлетворении указанного условия исключается локальное увеличение изоляционных промежутков на участках повышенной или максимальной напряженности электрического поля. Появление таких участков связано с общим ростом толщины всего изоляционного слоя, так как его местное увеличение обычно невозможно по технологическим или конструктивным условиям. Например, из-за краевого эффекта обмотки трансформатора или арматуры изолятора приходится увеличивать толщину изоляции вдоль всей поверхности, так как изоляция выбирается с учетом максимальной напряженности.

Утолщение изоляции из-за локальной повышенной напряженности можно избежать путем изменения радиусов кривизны электродов в опасной зоне или же изменения их формы. Иногда для этого достаточно заменить в обмотке трансформатора прямоугольный провод на круглый, обладающий большим радиусом кривизны.

Проектирование с учетом выравнивания электрических полей обеспечивает достижение минимальной толщины главной и наименьших размеров внешней изоляции, выбранной по кратковременной или длительной ее прочности. Такой подход обеспечивает одновременно создание изделия с минимальными габаритами и массой.

Таким образом, максимальная напряженность электрического поля  $E_{\max}$  будет равняться или приближаться к значению средней напряженности  $E_{\text{ср}}$ :

$$E_{\max} = k_n E_{\text{ср}},$$

где  $k_n$  — коэффициент неравномерности электрического поля;  $E_{\text{ср}} = U/l$  ( $l$  — толщина диэлектрика).

Проектирование высоковольтного изделия осуществляется с учетом коэффициента неравномерности электрического поля, значение которого в идеальном варианте приближается к единице, т. е.  $k_n = 1$ . Следовательно, максимальное значение напряженности поля в изоляции соответствует ее среднему значе-

нию и будет во всем объеме приблизительно одинаковым:  
 $E_{\max} \approx E_{\text{ср.}}$

В общем случае коэффициент неравномерности электрического поля зависит от радиуса кривизны электродов  $r_0$  и от расстояния между ними  $l$ , определяемых геометрическим коэффициентом  $\rho$ :  $k_n = f(\rho)$ ;  $\rho = r_0/l$ . Положительный характер роста величины  $\rho$  с целью уменьшения коэффициента неравномерности  $k_n$  сказывается до определенных пределов и имеет конкретные значения для каждого типа электродов.

При  $k_n = 1$  возникает равнопрочная в электрическом отношении конструкция, которая характеризуется не только мини-

Таблица 6.1

Вариант обмотки		Графическое изображение
Номер	Наименование	
1	Две обмотки с разными потенциалами относительно металлизированного торца	
2	Угловая часть обмотки в углу металлизированной части катушки	
3	То же, что вариант 1, но толщина обмоток меньше, чем толщина изоляции	
4	То же, что вариант 2, но толщина обмотки меньше толщины изоляции	
5	Угловая часть трапециевидальной обмотки относительно металлизированной части катушки	

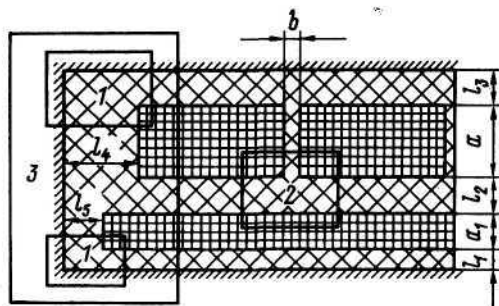


Рис. 6.1. Секционная катушка высоковольтного трансформатора (1...3 — области, выбранные для моделирования)

мальными габаритами, но и при правильном выборе допустимого значения электрической прочности изоляции, заданной надежностью, т. е. имеет заданный запас электрической прочности. Выбор геометрии системы изоляции (электродов и диэлектрика) производится аналитическим, графоаналитическим методом, или посредством моделирования электрических полей [31].

Аналитический метод для сложных конструкций является трудоемким и используется для определения максимальной напряженности электрического поля между электродами простой формы.

Графоаналитический метод при наличии достаточного количества кривых (семейства кривых) зависимости  $k_n = f(\rho)$  для данного типа электродов дает оперативную информацию и позволяет быстро найти для них оптимальные соотношения.

Аналитическое решение задач электрического поля ограничено типами электродов, ставших классическими. Графоаналитический метод получил распространение при проектировании типовых элементов конструкции, встречающихся в трансфор-

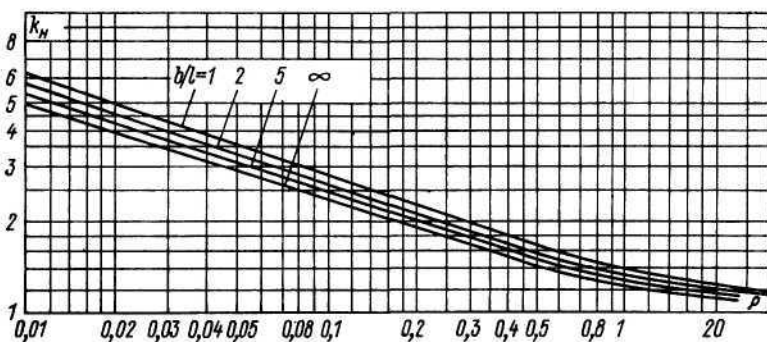


Рис. 6.2. Зависимость коэффициента неравномерности электрического поля  $k_n$  от коэффициента  $\rho = r_0/l$  для обмоток вариантов 1 и 2 табл. 6.1

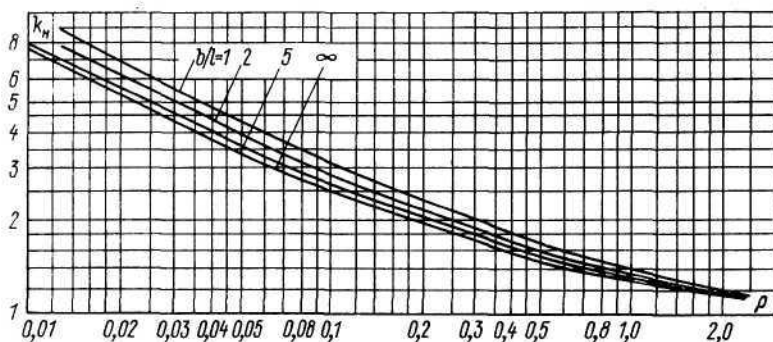


Рис. 6.3. Зависимость коэффициента неравномерности электрического поля  $k_n$  от коэффициента  $\rho = r_0/l$  для обмоток вариантов 3 и 4 табл. 6.1

маторах, дросселях, конденсаторах и в других высоковольтных изделиях. Зависимости  $k_n = f(\rho)$  для электродов произвольной формы определяются методом моделирования электрических полей.

В табл. 6.1 приведены примеры типовых конструкций катушек трансформаторов и дросселей. В общем виде катушка приведена на рис. 6.1. Наиболее распространенным является выбор изоляции в торцевой части катушки с металлизированной поверхностью или без металлизации.

При этом возможны два случая:

размеры обмотки равны или больше толщины слоя изоляции (варианты 1 и 2 табл. 6.1);

размеры обмотки меньше, чем слой изоляции (варианты 3 и 4 табл. 6.1).

Из приведенных на рис. 6.2 и 6.3 кривых следует, что для вариантов 1 и 2 зависимости  $k_n = f(\rho)$  при постоянных углах кромки и радиусах кривизны увеличение одного из размеров изоляции по сравнению с другими более чем в 2 раза не приводит к заметному (выше 15%) снижению коэффициента  $k_n$ .

Влияние на значение  $k_n$  изменения угла кромки обмотки показано на рис. 6.4. Из приведенных зависимостей видно, что трапециевидальная форма обмотки, которая применяется для увеличения разрядного расстояния поверхности между первым и последним слоями, с уменьшением угла  $\alpha$  приводит к росту коэффициента неравномерности у кромки обмотки.

Для представленного на рис. 6.2 увеличения изоляционного промежутка  $b$  между обмотками относительно торцевой изоляции в 2 раза и более не дает улучшения коэффициента неравномерности электрического поля больше чем на 10...15%. Эта зависимость соответствует реальному типовому промежутку, когда угол обмотки ВН обращен к обмотке НН, а толщина обмотки ВН больше в 2...3 раза толщины изоляции.

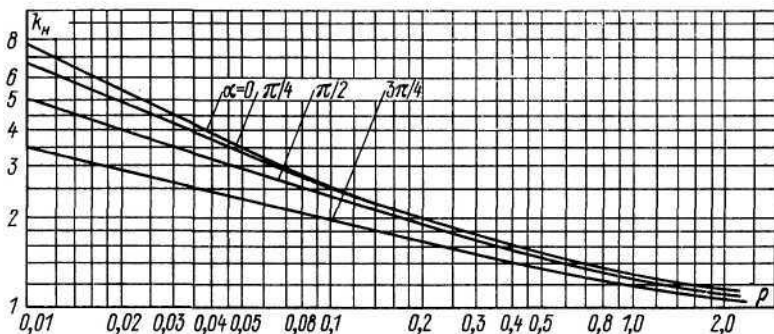


Рис. 6.4. Зависимость коэффициента неравномерности электрического поля  $k_n$  от коэффициента  $\rho=r_0/l$  для обмотки варианта 5 табл. 6.1

Увеличение радиуса кривизны кромки обмотки  $r_0$  в типовых вариантах 1...4 (табл. 6.1) с целью уменьшения коэффициента  $k_n$  целесообразно производить до значения  $r_0/l=0,3 \dots 0,5$ . Дальнейшее изменение радиуса кривизны обмотки незначительно улучшает коэффициент неравномерности.

Из кривых на рис. 6.2 и 6.3 следует, что изменение расстояния между секциями обмотки ВН слабо влияет на уменьшение  $k_n$  и его значение зависит, главным образом, от толщины обмотки, радиуса кривизны края секции и потенциалов на обмотках. Коэффициент неравномерности достигает значительных величин, если потенциалы на углах обмотки сильно различаются.

Как следует из кривых, приведенных на рис. 6.2 и 6.3, ими можно пользоваться, когда толщина торцевой части изоляции равна или больше толщины главной изоляции ( $b \geq l$ ), и когда отношение  $b/l$  равно 1, 2, 5 и бесконечности. Для промежуточных значений  $b/l$  при  $\rho = 0,1$  можно воспользоваться уравнениями.

В табл. 6.2 приведены типовые варианты прямоугольных и трапециевидных обмоток (или секций), расположенных у металлизированных торцов залитых эпоксидным компаундом катушек для  $l \geq 5D_{\text{пр}}$ ;  $D_{\text{пр}}/(2l) = \text{const}$  ( $D_{\text{пр}}$  — диаметр провода). Обмотки (секции) имеют различные значения коэффициентов  $k_n$  в точке А (на углу обмоток) при разных соотношениях толщины изоляции  $b$  и  $l$ . Сравнение значений  $k_n$ , приведенных в табл. 6.2 для варианта 1 и 3, показывает резкое увеличение коэффициента  $k_n$  при разных потенциалах на обмотках.

Такой же характер изменения зависимостей  $k_n=f(\rho)$  имеют варианты 2 и 4 для трапециевидных обмоток. С помощью зависимостей, приведенных в табл. 6.2, можно определить изменение при переходе от прямоугольных форм обмоток к трапециевидной форме.

Таблица 6.2

Вариант обмотки		Графическое изображение	Значение отношения $b/l$ при коэффициенте неравномерности $k_H$ , равном									
Но- мер	Наименование		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	Прямоугольные обмотки с разными потенциалами одного значения		—	6,6	5,0	4,2	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,7
2	То же, что вариант 1, но трапецеидальные обмотки		—	6,9	5,4	4,6	4,1	3,8	3,5	3,4	3,2	3,08
3	Прямоугольные обмотки с одинаковыми потенциалами и значениями		2,0	1,9	1,85	1,8	1,7	1,6	1,56	1,4	1,2	1,0



Вариант обмотки		Графическое изображение	Значение отношения $b/l$ при коэффициенте неравномерности $k_H$ , равном									
Но- мер	Наименование		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
4	То же, что вариант 3, но трапецидальные обмотки		2,2	2,1	2,0	1,97	1,8	1,77	1,74	1,5	1,3	1,0
5	Прямоугольные обмотки, одна из которых под нулевым потенциалом		6,0	3,9	3,2	2,9	2,7	—	—	—	—	—
6	То же, что вариант 5, но трапецидальные обмотки		6,1	4,1	3,5	3,2	3,0	—	—	—	—	—

На основании этих данных и картин электрических полей для них можно сделать следующие выводы:

1) максимальная напряженность рассмотренных конструкций определяется концентрацией поля вблизи кромки;

2) зависимость  $k_n = f(\rho)$  является монотонной функцией и оптимального соотношения между  $b$  и  $l$  не существует;

3) профиль электродов, соответствующий определенному значению  $k_n$ , можно найти по картине электрического поля.

Если по картине электрического поля можно обмотке придать форму эквипотенциала 0,6 или 0,8 (0,9 проходит у металлизированной поверхности), то поле между обмотками будет равномерным.

Увеличение радиусов кривизны и угла кромки в обмотке, необходимое для выравнивания электрического поля, достигается одним из следующих способов:

увеличением диаметра провода на углу обмотки;

изменением числа витков в слоях обмотки;

расположением вблизи угла обмотки экрана, обращенного вогнутой к углу и находящегося под потенциалом углового витка (или близкого к нему по значению).

В реальных конструкциях расстояние края обмоток ВН и НН от металлизированной поверхности катушек, т. е. слой изоляции на торце относительно этих обмоток, принимается в 1,5—2 раза толще слоя между обмотками (рис. 6.1, область 3). Результаты исследования значений  $k_n$  у верхней (точка 1) и у нижней (точка 2) кромок обмотки ВН ( $\varphi_3=1$ ) приведены в табл. 6.3. Они свидетельствуют о равенстве значений  $k_n$  для точек 1 и 2 прямоугольной катушки при одинаковых соотношениях  $l_1$  и  $l$  и различаются — для трапециевидной.

Электрическое поле катушек без металлизации на поверхности характеризуется повышенной напряженностью только на участках, приближенных к острым кромкам электродов. Картина электрического поля в таких конструкциях резко отличается от картины поля металлизированных С и D поверхностей катушек (рис. 6.5). Максимальная напряженность поля возник-

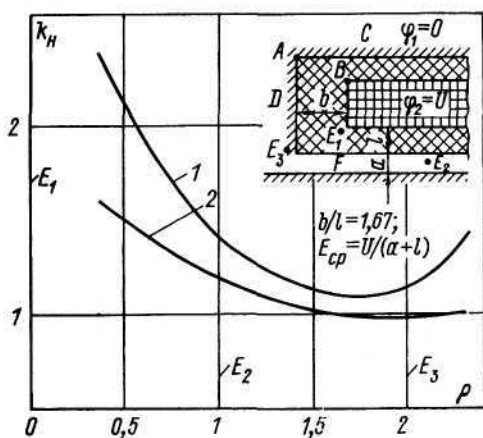
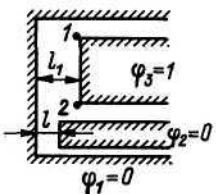
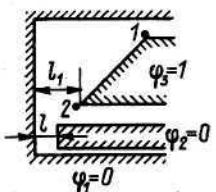


Рис. 6.5. Зависимость коэффициента неравномерности электрического поля  $k_n$  от коэффициента  $\rho = b/l$  при наличии металлизации (кривая 1) и без металлизации при наличии магнитопровода (кривая 2)

кает в воздушном зазоре. Особенно она возрастает при наличии деталей с острыми кромками. При увеличении воздушного зазора до значения, превышающего в 1,5 раза толщину изоляции ( $a/l \geq 1,5$ ), поле в зазоре можно считать равномерным и

Таблица 6.3

Исследуемая область	Коэффициент неравномерности $k_n$ при значении соотношения $l_1/l$ , равном					
	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
	Точка 1			Точка 2		
	5,00	4,50	4,32	4,94	4,51	4,33
	3,32	3,36	3,57	5,25	4,80	4,68

оно является неоднородным только у края металлизации (кривая 2 на рис. 6.5). Металлизация торцов катушки сказывается на росте максимальной напряженности поля в зазоре относительно магнитопроводов, но не отражается на ходе зависимости  $k_n = f(a/b)$ .

Целесообразность металлизации обусловлена наличием вблизи изделия заземленных элементов. В то же время учитывается, что коэффициент неравномерности электрического поля в главной изоляции при экранировании поверхности катушки может увеличиться на 10—60%.

Определение влияния на коэффициент  $k_n$  геометрии обмоток, расположенных на большом расстоянии от торцов или от боковых металлизированных поверхностей с учетом толщины намотки, показало, что имеет место большая, чем у других типовых промежутков, зависимость  $k_n$  от размеров обмотки. Особенно заметна зависимость коэффициента  $k_n$  от  $\rho$  для тонких обмоток.

Напряженность электрического поля в изоляции возрастает при наличии выступов над поверхностью намотки, а коэффициент  $k_n$  возрастает с увеличением выступающей части  $a$  и уменьшением ее радиуса кривизны (рис. 6.6).

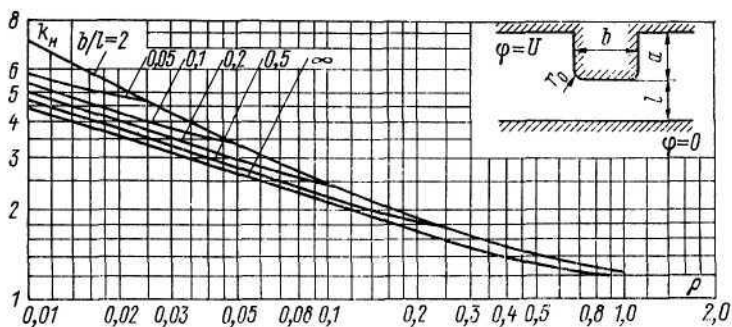


Рис. 6.6. Зависимость коэффициента неравномерности электрического поля  $k_n$  от размера выступа  $\rho = r_0/l$  одной обмотки относительно плоскости другой обмотки при  $a/l = 1,0$

Когда отношение ширины выступа  $b$  к оставшейся части изоляции и к краю выступа  $l$  больше единицы ( $b/l \geq 1$ ) в области  $\rho < 0,1$ , значение  $k_n$  определяется следующими уравнениями:

при  $a/l \leq 0,5$

$$k_n = 1,68 / (1 + a/l) \sqrt[3]{a/(l\rho)};$$

при  $a/l > 0,5$

$$k_n = \sqrt[4]{4/(\pi\rho) [1 - 1/(a/l + 1)^2]}.$$

Для изоляционных конструкций типа опорных, поворотных и проходных изоляторов электрическое поле внутренней и внешней изоляции невозможно разделить, так как оно определяется в большинстве случаев одной и той же арматурой. Учитывается также условие, что изоляционный промежуток по поверхности (или по воздуху) заведомо обладает даже в нормальных климатических условиях меньшей электрической прочностью, чем внутренняя прочность твердого диэлектрика, и требует большего изоляционного промежутка. Внутренняя прочность заведомо обеспечивается большим запасом.

Сложность разработки конструкции с коэффициентом  $k_n \rightarrow 1$  связана с необходимостью увеличения радиуса кривизны, а следовательно, и размеров металлической арматуры, которая является электродом изоляционной конструкции. Возрастание объемов металлических деталей в теле изолятора при их монолитной связи с диэлектриком приводит к увеличению термоупругих напряжений. Повышается вероятность образования внутренних трещин в теле изолятора и отслоений арматуры.

Минимизация термоупругих напряжений в монолитной изоляционной конструкции достигается не только благодаря исключению концентраторов механических напряжений, но также

за счет обеспечения минимальной разницы значений ТКЛР и модулей Юнга

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_n - \alpha_m \\ E_n' - E_m' \end{array} \right\} \rightarrow \min$$

и минимального содержания металла в арматуре или минимальной площади их поперечного сечения.

Для надежной эксплуатации значение термоупругих напряжений должно быть в 1,25—2 раза меньше длительного временного сопротивления диэлектрика на растяжение  $\sigma_b$  и длительной адгезионной прочности диэлектрика с арматурой  $\sigma_a$ . В первом приближении материалы для арматуры могут выбираться по максимальному коэффициенту работоспособности, во всем температурном диапазоне при эксплуатации:

$$k_p = [\sigma_b(\sigma_a)/\sigma_{т.х}]f(t),$$

где  $\sigma_{т.х}$ —терморелаксационная характеристика, определяющая способность диэлектрика к образованию термоупругих напряжений при монолитном соприкосновении с материалом арматуры и учитывающая не только ТУН, вызываемые различием характеристик материалов, но и влияние механических напряжений.

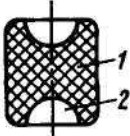
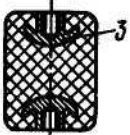
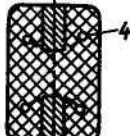
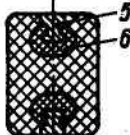
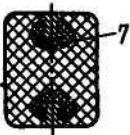
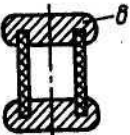
Рассмотренные положения позволяют разработать для трех основных типов изоляционных материалов (керамики, заливочных и прессовочных полимерных материалов) варианты электродов для конструкций с равномерным электрическим полем при минимальных значениях термоупругих напряжений. Создается основа для создания надежных изоляционных конструкций с взаимозависимыми электрическими и механическими характеристиками, обладающих изоляцией с заданным запасом электрической и механической прочности.

Схематически такие конструкции представлены в табл. 6.4.

В керамических изоляторах (вариант 1), изготавливаемых из высокочастотной керамики, например марки Б-17, методами литья или холодной обработки на токарных или фрезерных станках сырого материала с последующим отжигом, форма и размеры электродов образуются эллипсоидальными полостями в теле опорных изоляторов и их металлизацией посредством вжигания серебра. Металлическая арматура для крепления изолятора выбирается на основании конструктивно-технологических требований и обычно ограничивается применением букс с внутренней резьбой. Электрический контакт между буксой и металлизированной поверхностью (электродом) в изоляторе создается пайкой припоями, контактолом, электродиффузионной сваркой или любым другим способом, а букса в полости заливается портландцементом, эпоксидным компаундом и подобными адгезивами. Возможна заливка буксы в полость полу-

проводящим полимерным адгезивом без предварительного вжигания серебра.

Таблица 6.4

Номер варианта	Способ выравнивания поля	Схематическое изображение
1	Металлизирование эллипсоидальных полостей	
2	Эллипсоидальная металлическая арматура	
3	Металлическая сетка	
4	Арматура из полупроводящего или проводящего полимера	
5	Металлизированная полимерная арматура	
6	Дисковая арматура, заглубленная в трубчатое тело изолятора	

Примечание. В таблице обозначено: 1 — тело изолятора; 2 — металлизированная полость; 3 — металлическая арматура; 4 — металлическая сетка; 5 — металлическая буска; 6 — полупроводящая полимерная арматура; 7 — металлизация; 8 — дисковая, металлическая или полимерная полупроводящая арматура.



Вжигание в поверхность полости тонкого слоя серебра для образования электрода, обладающего минимальной металлоемкостью, обеспечивает устойчивость покрытия к деформациям, а также высокую адгезионную прочность и достаточную электрическую проводимость на высоких частотах с учетом электромагнитной прозрачности металла.

Применение серебра для образования надежного покрытия обусловлено не только близкими к характеристикам керамики значениями  $\alpha$  и  $E'$ , но и простотой технологических операций. Надежный электрический контакт керамики с серебром гарантирует однородность электрического поля из-за отсутствия под покрытием воздушных и инородных включений, минимальные диэлектрические потери на высоких частотах и возможность термообработки после заливки компаундом букс в полости изолятора.

Попытки изготовления полимерных прессованных изоляторов с электрическим полем, выравненным с помощью максимально облегченных металлических электродов (табл. 6.4, вариант 2), приводят к образованию трещин, отслоений и в конечном итоге — к пробою тела изолятора.

Оптимальным в электрическом и технологическом отношении вариантом монолитных опорных изоляторов с внутренней заделкой арматуры является эллипсоидальная форма электродов с расстоянием относительно боковой и торцевой поверхности тела изолятора не менее  $1/6$  диаметра.

Выравнивание электрического поля в изоляционных конструкциях из заливочных компаундов, для изготовления которых не требуется повышенного давления, минимальные ТУН достигаются применением электростатических экранов из металлической сетки (табл. 6.4, вариант 3). Края сетки для снижения краевого эффекта и увеличения механической прочности завальцовываются в проволочное кольцо.

Металлическая сетка имеет большую активную площадь адгезии и не разделяет тело изолятора на отдельные области полимеризации, как это наблюдается при использовании экранов из фольги. Экран из металлической сетки припаивается к латунной буксе, посредством которой он закрепляется в заливочной форме, и при установке обеспечивается электрический контакт экрана с внешним высоковольтным или заземленным элементом.

Для изоляционных конструкций из полимерных прессовочных или литьевых композиций с применением давления для выравнивания электрического поля используются полимерные металлизированные электроды или электроды из полупроводящих материалов, матрица которых имеет тот же состав, что и тело изолятора (табл. 6.4, варианты 4 и 5). Металлизированные электроды прессуются (или заливаются) из материала тела изолятора (например, из эпоксидного компаунда) и металли-

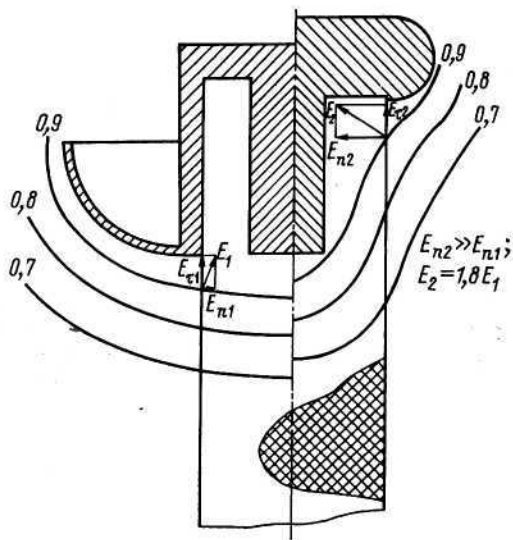


Рис. 6.7. Электрическое поле двух вариантов заделки арматуры в тело изолятора

зируются гальваническим электростатическим путем или шо-  
опированием цинком. Металлическая бокса с резьбой для креп-  
ления изолятора запрессовывается при изготовлении электрода.

При использовании трубчатых опорных изоляторов с внеш-  
ними электродами (табл. 6.4, вариант 6) минимизация коэф-  
фициента неравномерности и нормальных составляющих напря-  
женности электрического поля достигается двумя путями: ми-  
нимизацией напряженности электрического поля в зоне тройного  
сопряжения по внутреннему и наружному диаметру трубки,  
являющейся телом изолятора, и обеспечением формы электри-  
ческого поля с минимальной нормальной составляющей на-  
пряженности электрического поля, гарантирующей пробой не  
по поверхности, а по воздуху, что позволяет использовать не-  
коррозийные и недугостойкие материалы.

Минимизация коэффициента  $k_n$  и нормальной составляющей  
напряженности электрического поля основана на использо-  
вании экранирующего эффекта узкой щели в электроде, которая  
неспособна исказить ближайшую к электроду эквипотенциаль.

Для трубчатых конструкций такая минимизация выпол-  
няется с помощью арматуры, внешняя и внутренняя плоскости  
которой располагаются на одном уровне (рис. 6.7).

На рис. 6.7 показана картина электрического поля для ва-  
риантов опорных изоляторов с различными типами внешней  
арматуры, которые, помимо трубчатого, не исключают приме-  
нения и монолитного тела изолятора.

Из положения эквипотенциали 0,9 около внешней части арматуры видно, что размещение наружной и внутренней плоскостей арматуры на разных уровнях увеличивает значение максимальной напряженности почти в 2 раза, а нормальной составляющей напряженности — в 9 раз по сравнению с арматурой одного уровня.

Для повышения электрической прочности наружный диаметр арматуры выбирается по эмпирической формуле  $D_2 = D_1 + 3,3\delta - 2,7$ , где  $D_1$  — внутренний диаметр тела изолятора (трубки);  $\delta$  — толщина ее стенки.

На рис. 11.3 показан трубчатый изолятор на напряжение 20 кВ с оптимальной геометрией и размерами, а также показано распределение напряженности по наружной поверхности тела изолятора. Незначительное повышение напряженности отмечается только на арматуре, чего практически избежать невозможно.

Конструкционные размеры трубчатых изоляторов определяются методами планирования экспериментов, в результате которых получена эмпирическая формула, связывающая основные размеры:  $\delta = 0,8 + 0,3(D_2 - D_1)$ .

Эта зависимость справедлива для изоляторов, работающих при наиболее употребляемых в радиотехнических устройствах напряжениях до 40 кВ с длиной пути тока утечки от 30 до 150 мм и толщиной стенок трубки больше 3 мм.

Наиболее постоянное значение напряженности электрического поля вдоль активной поверхности электродов обеспечивается профилем Фелиси, который задается уравнениями:

$$x = d/\pi(2 \ln \cos \theta/2 - \cos \theta);$$

$$y = d/\pi - \theta + \sin \theta,$$

где  $d$  — минимальное изоляционное расстояние между электродами;  $\theta$  — параметр, изменяющийся от нуля до  $\pi$ . Однако сложность изготовления такого профиля сокращает области его применения.

В полимерных сварных конструкциях из полиэтиленовых или полипропиленовых труб, получивших применение в последние годы для высоковольтных выключателей и переключателей, возникли задачи выравнивания электрического поля по шву или в зоне формования замковых соединений с металлической арматурой.

Так как изготовление сварного шва с однородной структурой практически невозможно, то стараются поместить его в области минимальных напряженностей или в экранированной области, где поле отсутствует.

В высоковольтных реле на основе герконов управляющая обмотка помещается в эпоксидной изоляции, а для выравнивания электрического поля предусматривается канавка полукруг-

лого или эллипсоидального сечения, в которой уложенный провод образует оптимальное, относительно металлической внутренней, экранирующей геркон трубки, электрическое поле. Можно для уменьшения неравномерности поля, образованного проводом, паз металлизировать и обмотку укладывать на предварительно уложенный изолирующий слой.

## 6.2. ВЫРАВНИВАНИЕ ПОЛЕЙ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

Более высокая эффективность выравнивания в изоляционных конструкциях внешнего электрического поля по сравнению с выравниванием внутреннего поля обусловлена меньшим влиянием неоднородности структуры самого диэлектрика, в котором возможны раковины, поры, отслоения и другие технологические дефекты, искажающие поле.

Выравнивание поля на поверхности диэлектрика позволяет значительно сократить длину изоляционного промежутка и исключить коронирование, так как наличие локальных максимальных напряженностей плохо устраняется только с помощью увеличения расстояния между электродами.

Необходимость выравнивания поля внешней изоляции возникает при наличии воздушных зазоров, которые приводят к перераспределению поля между изолированными и неизолированными электродами, при наличии краевого эффекта и зоны тройного сопряжения, локальных неоднородностей и в других случаях.

Выравнивание электрического поля позволяет найти более рациональные и экономичные изоляционные конструкции, снизить массогабаритные характеристики и обычно осуществляется одновременно с решением конструктивно-технологических задач.

Наиболее общим способом выравнивания электрических полей залитых эпоксидными компаундами катушек трансформаторов и дросселей является нанесение на поверхность твердого диэлектрика проводящих или полупроводящих покрытий и заделка их острых краев, использование залитых на поверхности электростатических экранов в виде металлических сеток, специально обработанной фольги или проводящих и полупроводящих тканей.

Для выравнивания электрических полей в залитых эпоксидными компаундами катушках трансформаторов и дросселей заземленные экраны выполняются посредством металлизации поверхности катушки, тем самым исключается появление электрического поля в воздушном зазоре между катушкой и магнитопроводом. Так как этот воздушный промежуток шунтируется, то исчезает область повышенной напряженности электрического поля в изоляции с меньшим значением диэлектрической проницаемости в соответствии с выражением

$$\dot{E}_B / (E_K) = \epsilon_K / (\epsilon_B),$$

где  $\dot{E}_B$  и  $\dot{E}_K$  — напряженность электрического поля в воздухе и в компаунде;  $\epsilon_B$  и  $\epsilon_K$  — диэлектрическая проницаемость воздуха и компаунда.

Экранирование катушки выполняют химическим и гальваническим способами, напылением и другими методами, в результате которых на шероховатую поверхность компаунда наносятся проводящие или полупроводящие покрытия. Гладкая или глянцевая поверхность внешнего слоя эпоксидной изоляции снижает адгезионную прочность покрытия и делает ее неустойчивой к колебаниям температуры, особенно в отрицательной области, где термоупругие напряжения особенно значительны.

В работе [32] приводится выражение для определения «скалывающего» напряжения на поверхности раздела пластмассовой пластины прямоугольной формы и слоя металлизации:

$$\sigma_c = k(\alpha_K - \alpha_M)\Delta t E' a / l_c,$$

где  $\alpha_K$  и  $\alpha_M$  — ТКЛР пластмассы и металла;  $\Delta t$  — разность температур изготовления (стеклования) и заданной рабочей температуры;  $E'$  — модуль упругости материала металлизации;  $l_c$  — длина металлического слоя при температуре нанесения;  $k$  — коэффициент пропорциональности, учитывающий влияние различных конструктивных и технологических факторов.

Из уравнения следует, что «скалывающее» напряжение зависит от термоупругих напряжений, т. е. от разности ТКЛР и расхождения значений модуля упругости пластмассы и металла. Значение этого напряжения может быть снижено подбором параметров материала металлизации с меньшей разностью ТКЛР и модуля упругости относительно параметров диэлектрика. В табл. 6.5 приведены значения ТКЛР для металлов, применяющихся для металлизации.

Таблица 6.5

Металл	Модуль упругости, $\times 10^6$ МПа	ТКЛР, $\times 10^{-6} K^{-1}$	Металл	Модуль упругости, $\times 10^6$ МПа	ТКЛР, $\times 10^{-6} K^{-1}$
Алюминий	0,66—0,72	22,40	Никель	2,10	12,62
Золото	0,79	14,25	Олово	0,41	21,38
Кадмий	0,56	28,79	Свинец	0,18	27,56
Медь	1,10—1,30	16,23	Серебро	0,82	19,51
Хром	2,53	8,24	Цинк	0,84	28,35

Для металлизации эпоксидных компаундов обычно применяются цинк, алюминий и иногда медь. Цинк оказался наиболее удачным по своим технологическим и адгезионным свойствам. Металлизация цинком производится напылением из пистолетов Шооропа. Имеются опыты металлизации покрытия

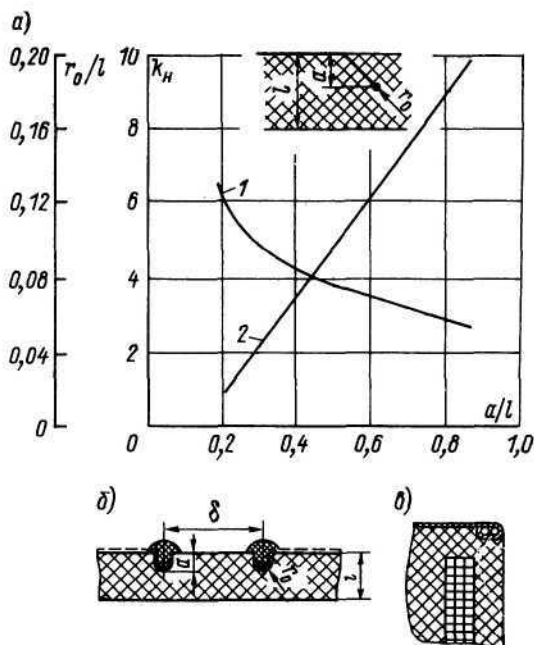


Рис. 6.8. Зависимость коэффициента неравномерности  $k_n$  электрического поля и отношения  $r_0/l$  от геометрии изоляции (а) посредством заделки края металлизации в канавку (б) и проволокой (в) ( $l$  — толщина изоляции;  $a$  — глубина заделки;  $r_0$  — радиус закругления;  $\delta$  — длина разрыва в металлизации)

$$1 - k_n = f(a/l); \quad 2 - r_0/l = f(a/l)$$

таким методом с последующим покрытием эпоксидной эмалью полиэтилена и фторопласта-4.

Ввиду наличия микропор и включения оксидов напыленный слой влаго- и газопроницаем, что приводит к необходимости его дополнительной защиты от внешних воздействий.

Электрическая проводимость напыленного слоя из-за микропор и наличия оксидов уступает в несколько раз проводимости исходного материала, но является вполне достаточной для экранирования.

Заливкой для этих же целей в поверхностный слой изоляции металлизированных тканей и металлических сеток одновременно достигается армирующий эффект и повышается механическая прочность изоляции. Уменьшается возможность появления трещин в компаунде и исключается дополнительная герметизация покрытия.

При металлизации возникает необходимость выравнивания электрических полей, образованных острыми кромками краев слоя. Снижение коэффициента неравномерности электрического поля, например, требуется на краях разрыва металлизирован-



ной ткани, который создается для того, чтобы исключить короткозамкнутый виток, образованный проводящим покрытием на катушке трансформатора или дросселя вокруг ядра магнитопровода.

На рис. 6.8 показаны варианты выравнивания электрических полей острых кромок посредством заделки края металлизации в канавку и использования проволоки круглого сечения.

Канавки в наружном слое эпоксидной изоляции формируются при заливке или протачиваются в готовом изделии перед металлизацией. После металлизации канавка заделывается эпоксидным компаундом. Проволока круглого сечения устанавливается в форме перед заливкой. Часто проволока завальцовывается в края экранов из металлической сетки или из металлизированных тканей. Такие экраны заменяют металлизированный слой на поверхности катушки или используются для выравнивания электрических полей в изоляционной конструкции.

Заделка краев разрыва металлизации необходима, когда ширина зазора  $\delta$  больше, чем половина толщины наружного слоя изоляции  $l$ . Коронирование на краях разрыва отсутствует, если выполняется условие  $\delta/l \leq 0,5$ .

Оптимальные соотношения для конструкции заделки края металлизации могут быть выбраны в соответствии с рис. 6.8. Кривая 1 построена на основании исследования картины электрического поля. Радиус закругления  $r_0$  и глубина заделки выбраны, исходя из расчета допустимой электрической прочности эпоксидного компаунда ЭЗК-31 при кратковременном воздействии поля на изоляцию и допустимой напряженности поля появления короны. Эти условия должны удовлетворяться в момент испытания изделия на электрическую прочность.

В рассмотренном случае наружная поверхность кривизны заделанной в изоляции металлизации располагается по нормали к противоположному электроду.

Влияние геометрии проволоки на выравнивание электрического поля при заделке краев металлизации на торце катушки (рис. 6.8) наиболее благоприятно проявляется при заливке двух рядом расположенных проволок диаметром 2 мм. При таком сочетании радиус кривизны заделки проволоки в рассмотренных вариантах имеет максимальное значение при минимальных габаритах.

Для ослабления поля у острого края одного из электродов используется полупроводящее покрытие сопротивлением

$$\rho_n \leq E_{\text{доп}} l / (\omega \epsilon U^2) \approx 10^8 \dots 10^9 \text{ Ом},$$

где  $E_{\text{доп}}$  — допустимое значение напряженности у края острого электрода, которое может выбираться, исходя из надежного отсутствия частичных разрядов, например при  $E_{\text{доп}} \leq 1,5 \dots 2 \text{ МВ/м}$ ;  $l$  — толщина изоляции у электрода;  $\omega$  — круговая

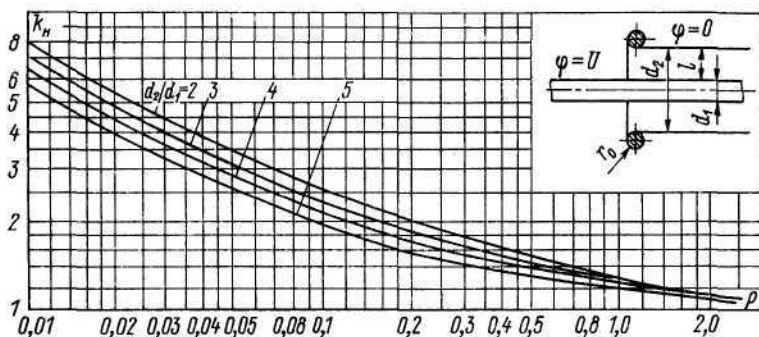


Рис. 6.9. Зависимость коэффициента неравномерности  $k_n$  электрического поля от коэффициента  $\rho = r_0/l = 2r_0(d_2 - d_1)$  для концевой разделки коаксиального вывода

частота;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость изоляции;  $U$  — напряжение у электрода.

Длина полупроводящего покрытия может быть выбрана из уравнения  $l_n \geq \sqrt{2l/(\omega\epsilon\rho_n)} l_n (2U/E_{\text{дон}}\sqrt{\omega\epsilon\rho_n}/l)$ , где  $\rho_n$  — поверхностное сопротивление изоляции у электрода.

Длину полупроводящего покрытия можно значительно сократить, если край его заделать в канавку или проволокой диаметром 2...3 мм.

Выравнивание электрического поля в области контакта металлической оплетки кабельного вывода с металлизацией катушки или с концевой разделкой коаксиального вывода можно производить, используя семейства кривых  $k_n = f(\rho)$ , представленных на рис. 6.9. Из кривых следует, что при радиусе кривизны заделки, большем, чем половина толщины изоляции, дальнейшее выравнивание поля становится недостаточно эффективным, так как приводит к значительному увеличению габаритов. Большее повышение электрической прочности и снижение коэффициента  $k_n$  при разделке кабелей достигается наращиванием на конце дополнительного изоляционного слоя конусной формы с канавкой на ее вершине и размещением в ней посредством края оплетки, которая вваривается в изоляцию по поверхности, где был нарушен с ней плотный контакт и могли возникнуть воздушные включения.

Методы выравнивания электрических полей опорных и проходных изоляторов с использованием машинных методов моделирования подробно рассмотрены в работе [31].

Для опорных изоляторов, в частности, предложен вариант тела с внутренней газовой полостью, которая позволяет снизить напряженность внутри и снаружи твердого диэлектрика на 15...30%.

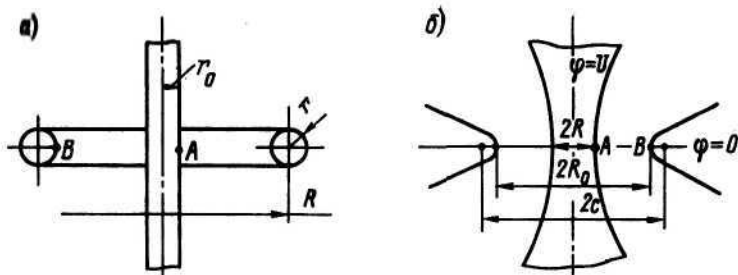


Рис. 6.10. Схематическое изображение гиперболического и катеноидного вводов

Выбор коаксиального ввода с электродами в виде кольца и стержня может быть осуществлен на основании расчета по уравнению Лапласа:

$$U/(2r_0 E_{r_0}) = R^2 - r^2 - r_0^2/[2(R^2 - r^2)] \ln 0,5 - (R/r - 1)(R/r_0^2 - r^2/r_0^2 - 1);$$

$$E_r/E_{r_0} = r_0/(2r)[R^2 - r^2 - r_0^2/(R - r)^2],$$

где  $U$  — разность потенциалов между стержнем и кольцом;  $r_0$  и  $r$  — радиус сечения стержня и кольца;  $R$  — радиус кольца;  $E_{r_0}$  и  $E_r$  — максимальная напряженность на поверхностях стержня и кольца.

Когда  $R \gg r_0$  и  $R \gg r$ , уравнение принимает вид

$$E_{r_0} = 2U/[r_0 \ln R^3/(2rr_0^3)], \text{ а } E_r/E_{r_0} = r_0/(2r).$$

Если задаться условием равенства градиентов на кольце и стержне, а также условием  $r_0 = 2r$ , то максимальная напряженность на вводе будет

$$E_{\max} = \frac{2U[r_0 \ln(r/r_0)]}{3}$$

Для гиперболического (рис. 6.10, а) или катеноидного (рис. 6.10, б) вводов с выравненными электрическими полями в точках  $A$  и  $B$  достигаются меньшие значения максимальной напряженности, чем напряженность в коаксиальном вводе.

Если значения  $R^* = R/R_0$  и  $E^* = ER_0/U$ , то максимальные значения  $E^*$  в относительных единицах для сравниваемых вводов примут следующие значения:

Радиус $R^*$ . . . . .	0,1	0,2	0,3	0,386	0,4	0,5	0,6	0,7
Коаксиальный цилиндр . . . . .	4,34	3,11	2,77	2,72	2,73	2,89	3,26	4,01
Ввод:								
гиперболический . . . . .	3,47	2,41	2,14	2,12	2,14	2,32	2,72	3,48
катеноидный . . . . .	2,39	1,86	1,80	1,86	1,91	2,16	2,61	3,40

Отсюда следует, что наиболее равномерное электрическое поле имеет место в катеноидном вводе при отношениях  $R/R_0 =$

$= 0,3 \dots 0,396$ . Следует отметить, что в этом случае будут наблюдаться и минимальные значения нормальной составляющей напряженности.

Более простыми в технологическом отношении и не требующими применения металлических массивных электродов сложной формы являются способы выравнивания электрических полей проходных изоляторов с помощью заливки внутрь их тела электростатических экранов из металлической сетки с завальцованными в проволочное кольцо краями или формирования канавки на поверхности тела изолятора.

Форма экрана и канавки, обеспечивающая оптимальную геометрию и размеры изоляторов при минимальных напряжениях внутри и на поверхности с коэффициентом  $k_n \rightarrow 1$ , выбирается методами моделирования электрических полей. Одновременно обеспечивается достижение минимального значения нормальной составляющей напряженности электрического поля.

Электростатический сеточный экран имеет приваренные металлические буксы с внутренней резьбой, посредством которых изолятор крепится на металлической стенке. При использовании металлизированной канавки составной фланец плотно входит в нее и надежно закрепляет изолятор в месте установки.

Способы выравнивания электрических полей с помощью металлической сетки и припаянных боксов и создание конструкций с квазиравномерным электрическим полем применяются для литьевых и прессовочных композиций.

Фигурная канавка используется для керамических, ситалловых, эпоксидных, фторопластовых или других диэлектриков, для которых помещение электростатических экранов внутри тела изолятора нецелесообразно в технологическом или конструктивном отношении.

Выравнивание электрического поля изоляции коаксиальных систем различается при использовании диэлектрических дисков или спиралей и опорных изоляторов. Для выравнивания электрического поля изоляторов используются уже описанные методы. Масса и габариты таких изоляторов могут быть уменьшены при использовании для выравнивания поля одновременно с арматурой также экрана для внутренних и внешних проводников, если они имеют достаточно большие диаметры по сравнению с диаметром арматуры изолятора.

Сравнение дисковых изоляторов с прямолинейными стенками и изоляторов с выгнутой (вогнутой) формой поверхности показали преимущество последних. Наиболее рациональная форма — параболическая, с фокусом параболы, лежащим снаружи от линии, соединяющей края электрода. Минимальное удаление вогнутости в средней части опоры должно составлять 35% плоскости, проведенной между краями диска. Разрядное напряжение при выбранной форме диска и расстояниях между

коаксиальными электродами 15 мм составляет около 85% пробивной прочности воздушного промежутка.

В работе [31] предложены дисковые изоляторы с изменением радиуса сечения, так что в плоскости, проходящей через ось вращения системы аксиальных электродов, площадь сечения твердого диэлектрика монотонно уменьшается с ростом радиуса по всей толщине изолятора или на его большей части. Форма границы раздела диэлектрика слабо влияет на распределение поля. Наиболее равномерное поле будет при  $l/D_0 \leq 5$ , а  $\epsilon_1/\epsilon_2 > D/D_0$ , где  $l$  — толщина изоляции (диска) на внутреннем электроде;  $D$  и  $D_0$  — диаметр внешнего и внутреннего электродов;  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  — диэлектрическая проницаемость материала диска и окружающей среды.

Повышенные напряженности около микровыступов на поверхности электродов всех типов конструкций соизмеримы с высотой микровыступа. Увеличенная напряженность на выступах отчетливо проявляется на повышенных частотах, когда стекание электронов становится особенно интенсивным.

Далее, для выступа в виде полусферы с радиусом, в 3—5 раз превышающим среднюю шероховатость обработки,  $E_{\max} = 3E_0$ , где  $E_0$  — напряженность на гладкой плоскости электрода. Для выступа в виде полуцилиндра  $E_{\max} = 2E_0$ ; для скругленного стержня

$$E_{\max} = E_0 \left[ 1 - \frac{0,5h \ln 3h \exp(2r) - \ln(h/r)}{2 \ln \sqrt{3h/\exp r}} \right], \quad r \gg h,$$

где  $h$  — высота выступа;  $r$  — радиус кривизны края выступа.

Влияние выступов практически не сказывается на расстоянии, в 4—5 раз превышающем высоту микровыступа.

В катушках индуктивности, вариометрах, дросселях к повышению напряженности электрического поля могут привести неровные поверхности отдельных проводов или стренг обмоточных высокочастотных проводов. Максимальная напряженность в этом случае определяется выражением

$$E_{\max} = E_0 \frac{\lambda}{m + \ln(\lambda/m)/\ln(r_2 - r_1)},$$

где  $E_0 = U/[r_1 \ln(r_2/r_1)]$  — наибольшая напряженность на гладкой поверхности катушки;  $m$  — число проводов или стренг;  $r_1$  и  $r_2$  — радиус намотки провода и изоляции, наложенной на обмотку, или изоляции высокочастотных проводов;  $\lambda = [1 + m \sin(\pi/m)]/\sin(\pi/m)$ .

Когда аналитические или графоаналитические методы расчетов максимальных напряженностей электрического поля отдельных участков изоляционной конструкции не обеспечивают достижение оптимальных вариантов системы изоляции, применяется оптимизация моделированием электрических полей.

# ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

## 7.1. ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование электрических полей представляет собой наиболее совершенный метод разработки оптимизированных массогабаритных и электрических характеристик изоляционных конструкций.

Применение математического моделирования является наиболее универсальным методом выбора формы и размеров электродов диэлектрика по заданным значениям напряженности внешней и внутренней изоляции при проектировании конструкций с равномерным электрическим полем или с учетом коэффициента его неравномерности.

Использование для этих целей вычислительной техники или аналоговых устройств позволяет определить распределение потенциалов и значение напряженности поля при заданных электрических и конструктивных параметрах изоляции или по полученной картине поля улучшить предварительно выбранную конструкцию.

Моделирование проводят как на стадии расчета основных изоляционных промежутков, так и при конструкторско-технологической обработке изделия.

Современные способы моделирования дают возможность построить картину электрического поля, не прибегая к использованию объемного моделирования, которое связано со значительными затратами труда и машинного времени, а процесс моделирования является очень сложным.

Расчет электростатического поля высоковольтной конструкции при заданных граничных условиях или при заданном распределении потенциалов на электродах выполняют на моделирующем устройстве в проводящей среде или на ЭВМ. На построение картины поля на таких устройствах не влияет разнообразие форм электродов и диэлектрика, что позволяет решать задачи электростатики независимо от симметричности конструкции в однородных и неоднородных средах с разными значениями диэлектрической проницаемости. Такой метод физического моделирования удобен тем, что обеспечивает максимальное быстрое действие при переналадке модели и снятии эквипотенциалей, но он не дает необходимой точности при определении координат эквипотенциалей. Особенно это сказывается при исследовании небольших локальных участков с источником местной неравномерности электрического поля.

Симметричные конструкции, к которым относятся тела вращения или изделия с одной или несколькими плоскостями сим-



метрии, моделируются соответственно плоскомеридианными и плоскопараллельными полями, а трехмерные поля асимметричных конструкций могут быть заменены комбинированными полями.

Для электрического моделирования применяются устройства со сплошной и дискретной проводящими средами. К первому типу относятся электролитические ванны и электроинтеграторы с электропроводящей бумагой [33]. В качестве устройств с дискретной проводящей средой применяются сеточные электроинтеграторы.

Такие устройства для моделирования могут найти широкое применение при небольшом объеме разработок высоковольтных изоляционных конструкций, так как не требуют специальной подготовки инженерно-технических работников и занимают небольшие площади.

Электролитические ванны могут использоваться для моделирования любых типов полей. На сеточных электроинтеграторах моделируются, в основном, плоскомеридианные и плоскопараллельные поля, а с помощью электропроводящей бумаги — плоскопараллельные поля.

В основе метода моделирования в проводящих средах лежит аналогия между уравнениями и граничными условиями электростатического поля в диэлектрике при отсутствии в нем объемных зарядов и поля стационарного тока в проводящей среде, в которой нет ЭДС. Поле стационарного тока может быть заменено полем переменного тока низкой частоты, если пренебречь ее реактивным сопротивлением. При одинаковых граничных условиях картины электрических полей в диэлектрике и в проводящей среде совпадают. Например, если систему электродов, находящуюся в пустоте, заполнить диэлектриком, проводящей или полупроводящей средой, в частности залить проводящей жидкостью, то электрическое поле не изменится и в обоих случаях будет одинаковым. Измерение потенциалов в жидкой проводящей среде на моделях осуществляется значительно проще, чем в реальных конструкциях.

Аналогия электростатического поля в диэлектрике и поля тока в проводящей среде может быть проиллюстрирована сравнением их основных зависимостей (табл. 7.1). Как видно из табл. 7.1, уравнение Лапласа  $\nabla^2 U = 0$  имеет одинаковый вид для диэлектрической и проводящей сред. В него не входят диэлектрические проницаемости и проводимости. Решая уравнение Лапласа, находят потенциалы  $U$  и напряженности электрических полей, которые пропорциональны в диэлектрической и проводящей средах.

Аналогия между электростатическим полем и полем постоянных токов существует и при наличии неоднородных сред. На границе двух сред происходит преломление линий вектора электрического смещения  $\mathbf{D}$  и вектора тока  $\mathbf{I}$ . Преломление

одинаково, если соблюдается условие  $\epsilon_1/\epsilon_2 = \gamma_1/\gamma_2$ , т. е. если диэлектрические проницаемости изолирующих сред относятся так же, как проводимости электролитов.

Функциональная схема моделирующего устройства (рис. 7.1), независимо от типа, включает в себя следующие элементы:

1) модель проводящей среды 2;  
2) блок питания БП, состоящий из стабилизированного источника постоянного напряжения или переменного напряжения низкой частоты, не кратного частоте питающей сети;

3) блок реализации граничных условий 3, состоящий из градуированных делителей напряжения  $R$ ;

4) устройство для измерения потенциала или напряжения в поле модели прямых измерений или для измерения компенсационным методом. Устройство состоит из градуированного потенциометра, одинар-

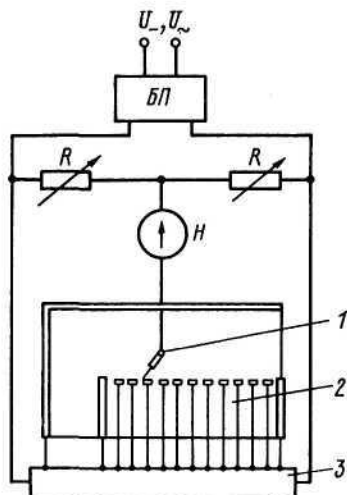


Рис. 7.1. Схема моделирующего устройства БП — блок питания;  $H$  — пульс-индикатор;  $R$  — градуированный делитель напряжения; 1 — зонд; 2 — модель; 3 — блок реализации граничных условий

Таблица 7.1

Постоянное электрическое поле в диэлектрике	Электрическое поле стационарного тока в проводящей среде
$\text{rot } \mathbf{E} = 0$ $\text{div } \mathbf{D} = 0$ $\mathbf{E} = -\text{grad } U$ $\nabla^2 U = 0$ $\Psi_D = \int_S D_n dS$  $\text{tg } \theta_1 / \text{tg } \theta_2 = \epsilon_1 / \epsilon_2$ $D_{n_1} = D_{n_2}$ $E_{t_1} = E_{t_2}$	<p>Важнейшие уравнения</p> $\text{rot } \mathbf{E} = 0$ $\text{div } \mathbf{j} = 0 \quad (j = \gamma E)$ $\mathbf{E} = \text{grad } U$ $\nabla^2 U = 0$ $I = \int_S j_n dS$  <p>Граничные условия</p> $\text{tg } \theta_1 / \text{tg } \theta_2 = \gamma_1 / \gamma_2$ $j_{n_1} = j_{n_2}$ $E_{t_1} = E_{t_2}$
<p>Аналогичные величины</p> $\mathbf{D}$ — электрическое смещение $\mathbf{E}$ — напряженность электрического поля $U$ — электрический потенциал $\Psi_D$ — поток электрического смещения	<p>Аналогичные величины</p> $\mathbf{j}$ — плотность тока $\mathbf{E}$ — напряженность электрического поля $U$ — электрический потенциал $I$ — электрический ток

ного или двойного зонда и измерительного прибора (вольтметра, гальванометра  $H$  или нуль-индикатора).

**Проводящие среды.** В электролитической ванне электропроводящей средой может служить водопроводная вода или слабый (0,01...0,10%) раствор солей. Водопроводная вода удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к электролитам: однородности среды; чисто активного сопротивления, удельное значение которого достаточно велико по сравнению с  $\rho$  материала электродов; меньшей химической активности к материалу электрода по сравнению с растворами солей; сравнительно небольшого поверхностного натяжения, благодаря чему отсутствуют заметные погрешности от мениска у стенок ванны, электродов и измерительного зонда.

Соответственно и электроды должны удовлетворять указанным требованиям, а также изготавливаться из материалов с низкой химической активностью и иметь поверхность, освобожденную от коррозии и обезжиренную.

Электропроводящая бумага, которая используется в качестве проводящей среды в электроинтеграторах, изготавливается с повышенным содержанием графита или соли.

Значение сопротивления бумаги  $R_{кв}$  — сопротивление квадратного образца — зависит от толщины  $d$ , плотности бумаги и содержания проводящего вещества, определяемого удельной электрической проводимостью. Сопротивление можно вычислить из выражения  $R_{кв} = 1/(\gamma d)$ , из которого следует, что сопротивление бумаги не зависит от размеров сторон квадрата. Значение  $R_{кв}$  колеблется от десятков до сотен килоом.

Недостатком бумаги является зависимость ее сопротивления от температуры и влажности окружающего воздуха и от направления проката листов. Вследствие анизотропии структуры изменяется значение сопротивления вдоль и поперек проката.

Достоинствами такой бумаги для моделирования, помимо простоты изготовления модели и возможности ее перемещения, является электронный тип ее проводимости, который исключает характерную при использовании электролитов контактную разность потенциалов относительно электродов.

Применение бумаги дает возможность избавиться от электролиза и позволяет благодаря использованию для питания модели постоянного тока, повысить точность моделирования.

В сеточных электроинтеграторах электропроводящая среда имеет дискретное строение в виде сетки, составленной из постоянных или переменных резисторов (рис. 7.2).

Резисторы  $R_1 \dots R_4$ , присоединенные к одному узлу, образуют элементарную ячейку сетки. Питание модели осуществляется от стабилизированного источника постоянного или переменного напряжения 10...30 В, значение которого регламентируется правилами техники безопасности помещения.

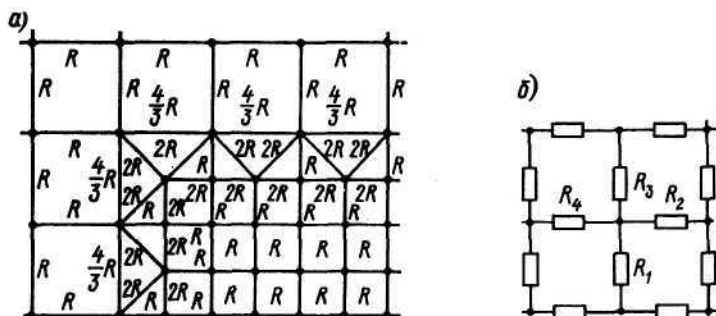


Рис. 7.2. Полоса согласования схемы сеточного интегратора (а) и элементарная ячейка (б)

Модель для исследования поля высоковольтной конструкции, изоляция которой состоит из материалов с разной диэлектрической проницаемостью, изготавливается из материалов (или из резисторов) с разной удельной электрической проводимостью.

Граничные условия по линии раздела сред в этом случае соответствуют аналогиям, приведенным в табл. 7.1.

**Область моделирования.** Исследуемая область поля реальной конструкции воспроизводится на модели с соблюдением геометрического масштаба  $m_l = l_m/l_p$  и масштаба напряжения  $m_U = U_m/U_p$ , где  $l_m$  и  $U_m$  — размер модели и напряжение в поле модели, а  $l_p$  и  $U_p$  — размер и напряжение в реальной конструкции.

Исследование полей сложных конструкций целесообразно производить по частям, выделяя для моделирования локальные области, главным образом области с резко неравномерным полем или требующие уточнения формы электродов и границы разделов диэлектриков.

Чтобы уменьшить погрешность от реализации граничных условий, область моделирования должна быть в 3...5 раз больше выделенной локальной области.

Область моделирования и локальные области выбирают так, чтобы соблюдалось геометрическое и электрическое подобие модели и натуре. Это подобие обеспечивается, если границами поля являются силовые и эквипотенциальные линии. В симметричной конструкции с симметричным распределением потенциалов (зарядов) линии симметрии являются эквипотенциальными или силовыми линиями. Выделенные локальные области моделируются в большом масштабе. Такой метод моделирования позволяет с большой точностью моделировать наиболее ответственные участки конструкции.

Для более резкого изменения плотности тока на границах двух сред применяется контактная решетка из вертикальных

проводящих штырей. Минимальная погрешность достигается при расстоянии между штырями  $l$ , не превышающем четырех диаметров  $D$  ( $l \leq 4D$ ), где  $D$  — диаметр штыря.

**Погрешности моделирования.** Основными источниками погрешностей моделирования на устройствах любого типа являются: неточность геометрического подобия модели реальной конструкции, ограниченность размеров модели при моделировании поля в неограниченных областях, неточность реализации граничных условий, погрешности измерительной схемы и метода измерений.

Неточность геометрического подобия модели натуре частично устраняется применением моделей с допусками по размерам, не превышающими  $\pm 1\%$ .

Погрешность, вызванная ограниченностью размеров модели уменьшается, если размеры области моделирования в 3... 5 раз превышают размеры локальной области.

Неточность реализации граничных условий, например в результате замены непрерывного распределения потенциала на границе природы дискретным его распределением, снижается подбором числа и сопротивлений резисторов, расстояний между ними.

Погрешности схемы и метода измерений уменьшаются посредством замены метода прямых измерений на компенсационный, повышения класса точности приборов и другими способами.

При моделировании на электролитической ванне появляются дополнительные погрешности в результате поляризации электродов, возникновения мениска вблизи электродов, зонда и краев ванны, конечного диаметра зонда. Суммарная погрешность при выполнении всех требований моделирования не превышает 10... 15%.

Моделирование на электропроводящей бумаге вносит дополнительные погрешности, связанные с неоднородностью и анизотропией бумаги и зависимостью ее характеристик от внешних условий. В сеточном электроинтеграторе дополнительные погрешности обусловлены дискретностью среды. Эта погрешность пропорциональна квадрату шага сетки, поэтому в местах с большей неравномерностью поля следует выбирать сетку с более мелким, обычно кратным первоначальному, шагом. Для уменьшения погрешностей в этом случае, в местах соединения сеток с разным шагом, применяют специальную полосу согласования (рис. 7.2, а). Суммарная погрешность моделирования составляет 5... 10%.

**Обработка результатов моделирования.** Результаты моделирования используются для определения по картине электрического поля и напряженности поля в отдельных точках и коэффициента неравномерности изоляционной конструкции с целью выравнивания поля и расчета изоляции.

Напряженность электрического поля можно приближенно найти из выражения  $E \approx \frac{m_l}{m_v} \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}$ , где  $\Delta\varphi$  — разность потенциалов;  $\Delta l$  — минимальное расстояние между эквипотенциалами в рассматриваемой точке.

Максимальная напряженность поля  $E_{\max}$  возникает либо на электродах, либо на границе раздела диэлектриков в точке, где расстояние между эквипотенциалами минимально:  $\Delta l = \Delta l_{\min}$ . Тогда коэффициент неравномерности определяется из выражения

$$k_n = \Delta\varphi l_{\min} / (U_m \Delta l_{\min}),$$

где  $l_{\min}$  — минимальный изоляционный промежуток в области моделирования, а  $U_m$  — напряжение на промежутке.

Устранение погрешности, возникающей при расчете поверхности кромки электрода с малым радиусом кривизны  $r_0$  при  $k_n > 2$ , достигается дополнительным умножением на коэффициент

$$k_0 = (1 + \Psi_1) [2 - \exp 3,5(\Psi/\pi - 1)] (r_0/\Delta l_{\min})^{\Psi_1},$$

где  $\Psi$  и  $r_0$  — угол и радиус округления кромки на модели;  $\Psi_1 = \Psi - \pi / (2\pi - \Psi)$ .

Выбор формы и размеров изоляции по картине поля производят методом последовательных приближений по значению допустимой напряженности электрического поля на электродах или на границе раздела диэлектриков. Оптимальный вариант достигается при равномерной напряженности поля изоляции:  $E_{\text{ср}} = E_m \leq E_{\text{доп}} = E_n/k_3$ , где  $E_n$  — электрическая прочность изоляции;  $k_3$  — коэффициент запаса, учитывающий влияние конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов.

Соответствующее расстояние между эквипотенциалами на модели определяется как  $\Delta l_{\text{доп}} = \Delta\varphi m_l / (E_{\text{доп}} m_v)$ .

При  $\Delta l \geq l_{\text{доп}}$  удовлетворяется условие  $E \leq E_{\text{доп}}$ . Этого добиваются методом последовательных приближений посредством поиска такой формы электродов и расстояний между ними, при которых расстояние между эквипотенциалами не превышает  $\Delta l_{\text{доп}}$ .

Форму электродов и диэлектрика выбирают близкой по геометрии к эквипотенциалам, ограничивающим найденную зону.

## 7.2. РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ НА ЭВМ

Другим способом обоснованного инженерно-технологического решения для оптимизированных изоляционных конструкций является проведение анализа систем изоляции посредством решения краевых задач электростатики на ЭВМ.

Этот метод также позволяет сократить трудоемкий этап макетирования опытных образцов изоляционных конструкций,



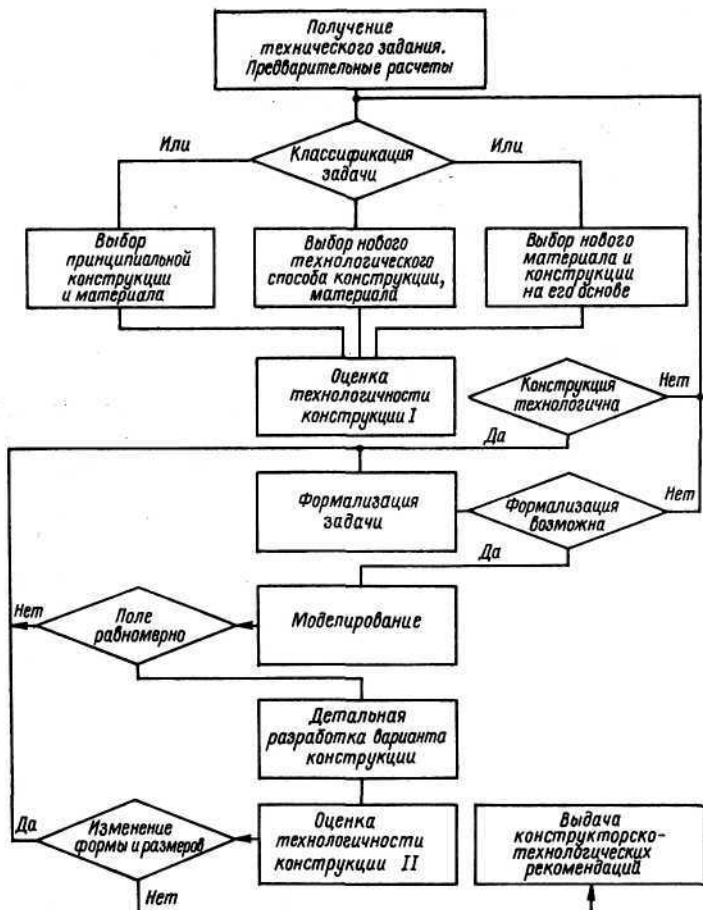


Рис. 7.3. Выбор изоляции с помощью моделирующего устройства

уменьшить погрешности при разработке вариантов и затраты инженерного труда, ускорить внедрение новых высоковольтных изделий в производство.

Программа для ЭВМ является информативной, если она представляет графический материал, наиболее приближающийся к требованиям конструкторской документации, и позволяет произвести глубокий анализ электрического поля. Это возможно при наличии поля эквипотенциалей, силового поля, значений напряженностей электрического поля и его нормальной и касательной составляющих в любой точке конструкции, определении градиентов и зарядов на поверхности электродов. Время подготовки исходных данных, моделирования и обработки результатов должно быть минимальным.

Независимо от используемого метода моделирования последовательность действий при проектировании изоляционной конструкции одинакова и проводится по блок-схеме на рис. 7.3.

Блок-схема предусматривает на основании полученного технического задания предварительные расчеты размеров внутренней и внешней изоляции с учетом принятой геометрии для решаемой функциональной задачи, а также типа изолятора или другой изоляционной конструкции.

Поставленная задача классифицируется, и производится выбор основных конструкторско-технологических решений и изоляционных материалов, обеспечивающих принятое решение. Возможно принятие решения о конструкции на основании выбранного изоляционного материала и его технологичности, способа переработки с учетом существующего технологического решения.

После выполнения предварительного эскиза с размерами рассматривается возможность его конструктивного воплощения и производится подготовка численного материала для моделирования одним из принятых методов. Если формализация для существующего метода неосуществима, то изменяется конструкция или технология.

Моделирование и анализ его результатов производятся до тех пор, пока не достигается необходимая электрическая прочность, степень равномерности электрического поля с учетом возможности его конструктивно-технологического воплощения или возникает уверенность в необходимости изменения исходных предпосылок.

При положительном решении начинается детальная разработка конструкции, технологии и оснастки, в ходе которой также возможны корректировка и дополнительное моделирование. Такой метод последовательных приближений с творческим осмыслением каждого последующего шага дает положительные результаты.

При моделировании рассматривается комбинированная изоляция без учета распределения электрических зарядов.

Для облегчения конструкторско-технологических решений форма электродов и изоляционного тела выбирается сравнительно простой, обеспечивающей быстрее приближение электрического поля к равномерному.

Расчетная точность должна обеспечивать в конечном итоге изготовление изоляционной конструкции с заданной электрической прочностью и поэтому целиком определяется технологическими погрешностями. Точность вычислений должна несколько превышать существующую точность изготовления.

Связь между затратами  $q$  на вычислительную процедуру и информативность (эффектом)  $F$  от точности модели представлена на рис. 7.4. Трудоемкость моделирования не должна превышать уровня, определяемого технологическими погрешно-

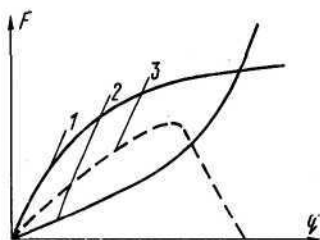


Рис. 7.4. Информативность модели

1 — полезность; 2 — стоимость;  
3 — отношение информативности к затратам

стями для конкретной конструкции.

Общее число вариантов моделирования в среднем лежит в пределах 2...7.

Для оценки числа итераций  $n$ , необходимых для достижения заданной точности  $q$  независимо от способа приближения к оптимальному варианту картины поля, используется выражение  $k_k < [q^n / (1 - q)] k'_n$ , где  $k_k$  и  $k'_n$  — конечное и начальное значения коэффициента неравномерности электрического поля, отсюда  $k_k(1 - q) / k'_n < q^n$ .

Если прологарифмировать обе части, то  $n$  оценивается из отношения

$$\ln \frac{k_k(1 - q) \ln q}{k'_n} < n,$$

числовые значения для которого берутся из табл. 7.2.

Таблица 7.2

Точность $q$	Число итераций $n$ для начального значения коэффициента $k'_n = 2$ при $k_k$ равном			
	1,05	1,11	1,18	1,25
0,95	46	34	27	23
0,90	23	17	13	11
0,85	15	11	9	7
0,80	11	8	7	5
0,75	9	6	5	4

Проведенные различными авторами сравнения показывают, что из всех известных способов расчетов электрических полей для изоляционных конструкций более высокой эффективностью обладают методы интегральных уравнений и эквивалентных зарядов.

Метод интегральных уравнений позволяет рассчитывать поля и получать решения как для закрытой, так и для открытой областей. Этот метод использует распределение поверхностной плотности зарядов распределения поля в выбранной области.

Входящий в этот ряд программ пакет ТОПАЗ содержит развитый входной блок со специально разработанным языком «Сезам». Входная информация состоит из описания геометрии области моделирования, граничных условий, описания входных данных, напряжений на электродах и т. д. Процесс выбора расчетных точек сводится к выполнению простых правил.

Использование пакета СЛАУ связано с составлением вызы-

вающей программы на языке «Фортран-IV», в которой определяются координаты эквивалентных зарядов и контурных точек. Увеличивается подготовка исходных данных. Пакеты универсальны и совместимы с другими пакетами программ. Они также могут быть использованы для различных вычислительных систем. Класс задач, которые могут решаться по системе СЛАУ, весьма широк и охватывает большинство возникающих в практике измерений случаев.

Программа АКСИАЛ предназначена для расчета осесимметричных и объемных электростатических полей в однородных средах и при наличии различных диэлектриков. Она позволяет производить расчеты поля при наличии одного внешнего поля, разделять заряды тонких оболочек, рассчитывать поле при неизвестном потенциале одного или нескольких тел (при заданном полном заряде одного из таких тел), определять напряженность и потенциал в заданных контрольных точках межэлектродного промежутка, учитывать симметрию или несимметрию поля, символически изображать конфигурацию электродов.

Программа в состоянии воспринять 15 расчетных тел (граничных условий первого и второго рода), под которыми подразумеваются либо отдельные электроды хотя бы и одного потенциала, либо отдельная граница раздела сред, не совпадающая с поверхностью электрода.

Для пакета АКСИАЛ исходная информация задается в кодированно-цифровом виде. По сравнению с программой ТОПАЗ несколько увеличивается время подготовки исходных данных. Для сравнительно простых задач, когда требуемое число расчетных точек невелико, АКСИАЛ является одним из наиболее экономичных.

Результаты анализа интегральных методов, включающих в себя пакеты прикладных программ ТОПАЗ, АКСИАЛ и СЛАУ, приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Программа	Погрешность $\Delta E$ , %	Отношение длины отрезка $l$ к радиусу кривизны $R$	Емкость памяти, Кбайт		Время решения задачи, с	Время подготовки исходных данных, мин	Число арифметических операций
			оперативной	внешней			
ТОПАЗ	1	0,27	32	62	87	5	$KN^2$
	5	0,62	32	58	40		
АКСИАЛ	1	0,21	32	20	64	10	$300N^2$
	5	0,48	32	19	37		
СЛАУ	1	0,16	30	0	46	30	$30N^2$
	5	0,36	27	0	25		

Из таблицы следует, что по времени подготовки исходных данных максимальное количество времени затрачивается при

использовании программы СЛАУ, а минимальное — ТОПАЗ. Однако по затратам машинного времени все происходит наоборот. По сравнению с ними выигрывает программа АКЦИАЛ, которая при затрате времени на подготовку всего 10 мин, т. е. в 3 раза меньше, чем СЛАУ, машинного времени расходует на 27% больше.

В книге использовались программы АКЦИАЛ и ЭФИР. Последняя основана на программе ТОПАЗ.

Пакеты обеспечивают решение задач для электростатического поля, т. е. решение уравнения Лапласа с соответствующими краевыми условиями для потенциала и его производных на границах расчетной области и границах раздела сред. Тип краевой задачи зависит от природы конкретной системы изоляции и ее геометрии. При этом для большинства задач, характеризующихся сложностью расчета, наличием областей с различными сочетаниями граничных условий нескольких типов, могут быть использованы обе программы.

Пакет прикладных программ ЭФИР предназначен для расчета двумерных (осесимметричных и плоских) электростатических полей и был разработан специально для задач, рассматриваемых в данной работе. Пакет позволяет проводить расчеты полей для различных граничных отрезков прямых или окружностей.

При расчете эллипсоидального поля оно аппроксимируется двумя радиусами окружности, как это выполняется в конструкторской документации.

Необходимым считается разработка исключительно технологически обоснованных геометрий и сопряжений с учетом возможности потерь на оптимизацию в электростатике, которые обычно компенсируются надежностью изготовления заданной формы конструкции в производстве.

На участках могут задаваться краевые условия первого, второго и третьего рода или условия сопряжения на поверхностях раздела сред с различными диэлектрическими свойствами. Граница расчетной области может быть одно- или многосвязанной, замкнутой или разомкнутой.

Пакет включает входной язык, позволяющий наглядно и оперативно описывать информацию о краевой задаче и задание на расчет. Вся программа написана на алгоритмическом языке «Фортран-IV».

Исходные данные о краевой задаче, записанные на входном языке «ВК», представляют собой последовательность списков, т. е. перечисление параметров, которые однозначно определяют описание задачи и представляют координаты, задающие геометрию системы изоляции.

Координаты могут быть взяты непосредственно с эскиза или чертежа. При этом достаточно задавать координаты начала и конца прямолинейных отрезков, а также координаты

центра окружности и точек ее начала и конца.

Список граничных условий задает перечень существующих в данной системе изоляции реальных условий. Список сплайнов определяет порядок обхода точек, присваивает отрезкам соответствующие им граничные условия и дает число разбиений границ на точки, которые в пакете будут использованы при вычислении.

В данном контексте термин «сплайн», относящийся к аппроксимации различных граничных условий при реализации метода интегральных уравнений, рассматривается как ключевое слово, определяющее данный список (список сплайнов), задающий порядок обхода границ.

Пакет имеет возможность производить графическое отображение характеристик электрического поля в виде линий равных значений на АЦПУ или на графопостроителе.

Для этого вычисления строятся в два этапа: на первом вычисляется значение характеристик, производится ограничение расчетной области и выдаются функциональные зависимости в виде графиков от координат; на втором выдается подробная графическая информация.

Эту выдачу производит система СЕРВИС, входящая в состав пакета ЭФИР. Выдаются следующие характеристики:

рисунок расчетной области вместе с системой координат;

график функциональных зависимостей;

рисунки векторного поля, полей эквипотенциалей, силового и равной напряженности, наложенных на изображение расчетной области с системой координат.

Таким образом, выдается практически вся необходимая для проектирования информация, за исключением нормальных и касательных составляющих напряженности электрического поля.

Возможность получения этой информации на интересующих отдельных участках поля методом лупы позволяет, например, в зоне тройного сопряжения внешних электродов рассчитать недостающие условия образования самостоятельности разряда при заданном напряжении.

Для эффективного использования рассмотренных методов расчета электрических полей необходимо наличие универсальных, физически обоснованных критериев оптимизации.

## **ГЛАВА ВОСЬМАЯ**

### **ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

#### **8.1. КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ**

Оптимизация любой системы изоляции независимо от ее назначения сводится к достижению возможно меньших габаритов



и массы при заданных запасах электрической и механической прочности и при наименьших затратах труда. Особое внимание уделяется надежности эксплуатации при условии отсутствия частичных разрядов внутри и на поверхности изоляции. Учитываются особо сложные условия работы при непрерывных переходных процессах с различной формой нагрузки, при перенапряжениях, тяжелых механических и климатических воздействиях.

Снижение габаритов и массы отдельных изоляционных конструкций иногда приводит к значительному уменьшению размеров всего радио- или электротехнического устройства. Непременно достигается снижение трудозатрат, размеров технологической оснастки и приспособлений, энергоемкости обслуживания и обрабатывающих станков.

Минимальные массогабаритные характеристики конструкций при заданном запасе электрической и механической прочности возможны при равномерном распределении этих нагрузок внутри твердой изоляции и на ее поверхности.

Принцип равнопрочности, в первую очередь, имеет место при электрическом поле, близком к равномерному, когда  $k_k \rightarrow 1$ , а термоупругие напряжения имеют минимальные значения ( $\sigma_v \rightarrow \min$ ) и равномерно, без концентраторов напряжения, распределяются по всему объему изоляции.

Как было показано в § 2.2, при  $k_n \rightarrow 1$  повышается срок службы изоляции, поверхностные частичные разряды (ПЧР) возникают практически при предпробойных значениях напряженности электрического поля, повышается напряжение образования самостоятельного разряда и напряжение возникновения объемного заряда, а на высоких частотах повышается напряжение раскалывания диэлектрика (термоупругий пробой). Повышается также напряжение, при котором происходит снижение пробивных напряжений при частотах, превышающих первую критическую.

Было также показано, что при более низких внутренних механических напряжениях повышается срок службы твердой изоляции и улучшаются ее электрические характеристики.

В конструкциях с равномерным или слабо неравномерным полем и с минимальными ТУН удовлетворяются главные требования разработки изоляционных конструкций любого назначения и обеспечивается, при прочих равных условиях, достижение минимальных габаритов и массы, повышение надежности.

Минимизация величин  $k_n$  и  $\sigma_v$  принимается в качестве основных критериев оптимизации.

Повышение электрической прочности по поверхности изоляции или уменьшение изоляционных промежутков может иметь место при минимизации нормальной составляющей напряженности электрического поля  $E_n$  и уменьшении площади поверхности тела изолятора. Обе характеристики зависят главным

образом от размеров и формы поверхности изоляции.

Отрицательное влияние роста доли нормальной составляющей напряженности электрического поля на границе раздела поверхности диэлектрика и воздуха описано в § 3.1. Увеличение нормальной составляющей может проявиться в уменьшении на 20...30% значения напряжения поверхностного пробоя.

При резко неравномерном поле и большой нормальной составляющей, при прочих равных условиях, снижается напряжение возникновения ПЧР и стримеров, более медленно растут напряжения поверхностного пробоя с ростом расстояния между электродами.

Сам поверхностный пробой чаще происходит непосредственно по поверхности, чем по воздуху, оставляя трек и снижая электрическую прочность конструкции.

Минимизация нормальной составляющей ( $E_n \rightarrow \min$ ) может служить третьим по значимости критерием оптимизации.

Универсальным условием оптимизации независимо от функционального назначения конструкции является также уменьшение площади поверхности диэлектрика, что достигается исключением выступов и заглублений (см. § 6.2). Это условие обеспечивает, помимо снижения значения нормальной составляющей напряженности, также уменьшение максимальной напряженности электрического поля и снижение коэффициента его неравномерности. Обеспечиваются условия более равномерных условий увлажнения и загрязнения.

Формализовать данный критерий можно как  $S_{\text{пов}} \rightarrow \min$ , причем площадь  $S_{\text{пов}}$  определяется индивидуально в зависимости от геометрии тела изолятора.

Следующим критерием, способным улучшить электрические свойства изоляционной конструкции, является повышение (максимизация) напряжения возникновения самостоятельного разряда, которое зависит также от формы (геометрии) системы изоляции.

На этот критерий сильное влияние оказывают конструктивно-технологические факторы: компоновка арматуры, ее радиусы закругления, наличие поднутрений в зоне металл — диэлектрик — воздух и в особенности — газовый клин между диэлектриком и арматурой.

Все приведенные критерии оптимизации являются универсальными, в большей или меньшей степени зависят от степени равномерности электрического поля и могут определяться последовательно с учетом моделирования картины электрического поля.

К универсальным критериям могут быть отнесены экономические характеристики минимизации материало-, трудо- и энергоемкости. В отдельных случаях наряду с универсальными могут учитываться индивидуальные критерии. Например, при сохранении условия  $k_n \rightarrow 1$  возможно требование минимальной

высоты для поворотных или диаметра для проходных изоляторов.

При разработке высокочастотных высоковольтных конструкций специфическим требованием для твердых диэлектриков с высокими значениями модулей Юнга приобретает критерий максимизации напряженности электрического поля. Существенным фактором становится максимизация напряжения образования факельного разряда  $U_f$ . Помимо равномерности электрического поля при  $E_{\text{туп}} \rightarrow \text{тах}$ , имеет значение условие равномерного нагревания или охлаждения тела изолятора, а для  $U_f$  — специфические условия его образования (§ 3.2).

Формализация критериев  $k_n \rightarrow 1$ ,  $\sigma_v$ ,  $E_n$ ,  $S_{\text{пов}} \rightarrow \text{min}$  и  $U_0$ ,  $U_f$ ,  $E_{\text{туп}} \rightarrow \text{тах}$  осуществляется применительно к конкретным размерам системы изоляции, включающей в себя диэлектрик и арматуру (электроды) изоляционной конструкции.

Оптимальность варианта конструкции, учитывающего все приведенные критерии, определяется методом последовательных приближений в процессе решения конструкторско-технологических, электрофизических, физико-механических и экономических задач (см. рис. 7.3).

Для отдельных типов изоляционной конструкции можно решить комплексную задачу оптимизации по специальной программе на ЭВМ, что целесообразно при разработках большого числа конструкций одинакового функционального назначения.

Универсальное применение программы ЭВМ на оптимизацию по критериям приобретает неоправданно громоздкий характер и связано с большими затратами машинного времени. Невозможно также учесть все конструктивно-технологические варианты применительно к оборудованию завода-изготовителя изоляционных конструкций. Даже при разработке экспериментального образца с учетом возможности его быстрого изготовления приходится творчески переработать несколько вариантов в зависимости от наличия необходимых материалов или возможности выполнения отдельных технологических операций.

Новые решения уже смоделированной конструкции могут возникнуть на конструктивно-технологической или экономической стадии проработки и потребовать нового оптимального сочетания критериев и следующего моделирования электрического поля.

## 8.2. ВЫБОР ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Выбор изоляционных промежутков и всей системы изоляции проходит в несколько этапов (см. рис. 7.3), включающих в себя предварительные варианты разработки и окончательный.

Многолетняя практика определила целесообразность следующих взаимосвязанных последовательных действий на предварительном этапе проработки:

1. Выбор диэлектрика с необходимыми электрофизическими, физико-механическими и технологическими свойствами.

Определение типа твердой изоляции целиком зависит от функционального назначения конструкции, условий эксплуатации, которые включают в себя не только значение рабочего напряжения, возможных перенапряжений, частоту сети, механических нагрузок, но также климатические воздействия и режимы эксплуатации, которые могут быть кратковременными, повторно-кратковременными или длительными.

2. Определение основных конструкторско-технологических решений, зависящих главным образом от назначения конструкции, типа выбранного диэлектрика, геометрии диэлектрика и электродов.

Форму отдельных элементов системы изоляции подбирают уже известной геометрии, гарантирующей в окончательном виде минимальный коэффициент неравномерности электрического поля и достижение остальных критериев оптимизации.

3. Выбор коэффициентов запаса по электрической  $k_3$  и механической  $k_{3,м}$  прочности.

Решение связано с рассмотрением условий эксплуатации, заданной техническим заданием группой жесткости, возможности хранения и транспортировки, а также с технологической сложностью.

Значения коэффициента запаса внешней электрической прочности с учетом повышенной влажности в зависимости от рабочего напряжения приведены ниже:

Коэффициент запаса . . . . .	2,5...3	2,2...2,5	2,0...2,2
Рабочее напряжение, кВ . . . . .	5...20	20...100	100

Возможность перенапряжений допускается не превышающей полукратного максимального рабочего, что определяется для изоляционных конструкций условиями селективности защиты. Принимается во внимание уровень ответственности высоковольтных конструкций в общей системе радио- или электротехнического устройства и уровень технологичности, под которым понимаются оптимальные условия изготовления, гарантирующие однородность структуры изоляции, стабильность и воспроизводимость технологических процессов при производстве отдельных элементов и всей конструкции.

Коэффициент запаса увеличивается с ростом уровня ответственности и уровня технологичности.

Коэффициенты запаса механической прочности с учетом длительных нагрузок для приближенных расчетов приведены ниже:

Коэффициент запаса для аппаратуры:			
стационарной . . . . .		2,0	2,2 2,5
передвижной . . . . .		2,2	2,5 2,75
Масса, кг . . . . .		100 100...300	300

Помимо условий эксплуатации и изготовления, учитывается отношение длительного временного сопротивления на растяжение  $\sigma_p$  к предполагаемому термоупругому напряжению  $\sigma_v$ , которые определяются в зависимости от характеристик и ориентировочной площади поперечного сечения инородных, относительно диэлектрика, материалов.

Коэффициент запаса увеличивается в зависимости от уменьшения отношения  $\sigma_p/\sigma_v$ , т. е. с увеличением факторов, увеличивающих ТУН.

4. Рассчитывается предварительная толщина внутренней изоляции в зависимости от электрической и механической прочности с учетом возможных ТУН, а также определяются размеры внешней изоляции.

Изоляционные расстояния для внутренней и внешней изоляции определяются в зависимости от электрической прочности на участках возможной максимальной напряженности, исходя из средней напряженности электрического поля  $E_{ср}$  для внутренней изоляции, равной 1,5...4 МВ/м, и допустимой жесткости монолитной конструкции, определяемой отношением объемов инородных материалов к объему всей ИК, не превышающим 0,55.

Для внешней изоляции напряженность  $E_{ср.пер} = 0,6 \dots 1,5$  МВ/м и зависит от расстояния между электродами.

Для высокочастотных ИК производится предварительное рассмотрение условий образования термоупругих пробоев.

5. Производится сравнительный технико-экономический анализ отечественных и зарубежных аналогов.

Каждый этап разработки системы изоляции и конструкции в целом предусматривает оптимизацию массогабаритных, электрофизических, физико-механических и технологических характеристик в соответствии с критериями оптимизации на основе моделирования электрических полей.

После моделирования, когда достигнут оптимальный вариант, начинается детальная отработка конструкции (рис. 7.3).

Изоляционные расстояния (толщина диэлектрика или длина поверхности) определяют в зависимости от электрической прочности на участках с максимальной напряженностью поля  $E_{max}$  по условию

$$E_{max} = E_{доп} = E_n/k_3, \quad (8.1)$$

где  $k_3$  — коэффициент запаса, учитывающий конструктивно-технологические факторы;  $E_{доп}$  — допустимая напряженность;  $E_n$  — электрическая прочность, определяемая экспериментально для заданного срока службы компаунда (табл. 8.1).

Расчет напряженности  $E_{доп}$  производится с учетом допустимого уровня частичных разрядов изоляции и отсутствия теплового пробоя. Одновременно рассматривается длительное при

Таблица 8.1

Тип компаунда	Кратковременная нагрузка, МВ/м, при температуре, °С, равной		Электрическая прочность, МВ/м, при температуре 120 °С							
			для равномерного поля				для неравномерного поля			
	при продолжительности эксплуатации, ч, равной									
	20	120	500	1000	5000	10 000	500	1000	5000	10 000
ЭЗК-1	25,0	18,0	9,8	9,1	8,4	7,8	3	2,1...2,5	1,7...2,2	1,5...2,0
ЭЗК-31	17,7	16,0	9,2	8,9	8,4	7,9				

эксплуатации и кратковременное при испытаниях и возможных перенапряжениях воздействие механической нагрузки.

В качестве примера приводятся значения электрической прочности эпоксидных компаундов горячего отверждения ( $k_n = 1$ ) и резко неравномерного электрического поля.

Для выбора толщины эпоксидной изоляции в зависимости от механической прочности можно воспользоваться данными, приведенными в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Тип компаунда	Временное сопротивление на растяжение, МПа, при температуре, °С, равной								
	100	80	60	40	20	0	-20	-40	-60
ЭЗК-1	200	350	600	700	730	910	1000	1040	1060
ЭЗК-10	273	446	532	562	650	616	630	630	650
ЭЗЛ-120	—	—	—	—	700	—	—	—	—
ЭЗК-31	200	350	600	700	740	940	1000	1040	1100

Все приведенные значения получены при определенном уровне технологии заливки и не претендуют на универсальность. В каждом отдельном случае толщина внутренней изоляции выбирается в зависимости от электрической и механической прочности, особенностей конструкции и возможных ТУН.

Для выбора внешней изоляции можно использовать параметры, рассчитанные в гл. 3, с учетом приведенных коэффициентов запаса.

Расчет изоляции трансформатора или дросселя является составной частью общего расчета и производится методом последовательных приближений. От коэффициента заполнения окна магнитопровода медью зависит ориентировочное значение толщины изоляции, которое может быть проверено исходя из электрической прочности 1,5...4 МВ/м. Для изделий с напряжением до 5...7 кВ толщина изоляции определяется главным образом в зависимости от механической прочности или технологических возможностей, способных обеспечить минимальную толщину эпоксидного слоя.

Так, для изделий мощностью до 10...20 В·А минимальная толщина изоляции может быть 3 мм. С увеличением габаритов



ритных размеров толщина возрастает до 6 и даже до 10 мм, что значительно превосходит необходимую для рабочего напряжения 5...7 кВ толщину компаунда по электрической прочности.

Предварительная проверка механической прочности изоляции производится по допустимой жесткости обмоток, которая определяется отношением объема меди к объему всей катушки. Это отношение не должно превышать 0,55.

При дальнейшей разработке изоляции трансформаторов предусматриваются два взаимосвязанных метода определения размеров и формы компаунда по условию электрической прочности с учетом коэффициента неравномерности электрического поля и по условию механической прочности на основе расчета термоупругих напряжений.

Последующая разработка изоляции трансформаторов может быть представлена в такой последовательности:

1) после ориентировочного определения размеров и форму главной изоляции уточняют по условию электрической прочности с учетом неравномерности электрического поля и влияния жесткости обмотки на термоупругие напряжения в изоляции;

2) производят расчет механической прочности изоляции в зависимости от термоупругих напряжений;

3) если напряженность электрического поля или механические напряжения превосходят соответственно электрическую или механическую прочность компаунда или если необходимо уменьшить размеры изделия за счет уменьшения толщины изоляции, то принимают меры по уменьшению напряженности электрического поля и термоупругих напряжений; возможно также использование средств по увеличению электрической и механической прочности компаунда.

В такой последовательности расчет повторяют до момента, пока напряженность электрического поля и термоупругие напряжения не будут соответствовать электрической и механической прочности изоляции.

После выполнения указанных условий производят выбор остальных размеров, в том числе внешней изоляции.

Изоляционные расстояния выбираются в зависимости от рабочего напряжения на изоляции  $U_p$ , т. е. наибольшего значения напряжения, длительное воздействие которого на изоляцию изделия допустимо в условиях его эксплуатации или испытаний.

В высокопотенциальных трансформаторах это напряжение может определяться суммарным напряжением между началом и концом обмотки  $U_{\sim}$  и потенциалом, под которым находится обмотка. Если потенциал имеет постоянное напряжение  $U_{=}$ , то

$$U'_p = kU_{=} + U_{\sim}, \quad (8.2)$$

где  $k = 0,5$ .

Это рабочее напряжение определено для переменного напряжения. В зависимости от условий эксплуатации по формуле (8.2) могут определяться импульсные или с различной формой кривой напряжения.

Кроме того, на изоляцию в процессе работы могут воздействовать максимальные напряжения  $U_{\max}$  различной длительности и формы кривой, например, перенапряжения импульсной формы или испытательные напряжения в течение одной или пяти минут.

Для обеспечения надежной изоляции ее характеристики выбирают в соответствии с прочностью компаунда при длительном или кратковременном воздействии напряжения. Для неравномерного поля эти напряжения обозначаются  $E_{д.н}$  и  $E_{к.н}$ .

Параметры внешней изоляции будут определяться в зависимости от электрической прочности при поверхностном пробое с учетом окружающих условий (атмосферного давления, относительной влажности и т. д.). Все значения электрической прочности компаундов приведены в гл. 2.

Дальнейшее проектирование изоляции производится в зависимости от допустимой электрической прочности  $E_{доп}$  с учетом неравномерности электрического поля — см. формулу (8.1).

Коэффициент запаса для главной изоляции принимают  $k_3 = 1,5 \dots 2,0$ . Для внешней изоляции его значения приведены ранее.

Разброс значений электрической прочности компаунда, вызванный рецептурными и технологическими факторами, учитывают выбором соответствующей электрической прочности с заданной вероятностью.

Весь расчет ведут в предположении, что уровень частичных разрядов не превосходит допустимого значения. Также имеется в виду отсутствие теплового пробоя.

Из двух значений изоляционных расстояний, полученных с учетом длительного и кратковременного воздействия, выбирают большее.

Механический расчет параметров эпоксидной изоляции трансформаторов и дросселей производят для исключения появления трещин или отслоений эпоксидного компаунда от заливных деталей в процессе эксплуатации, хранения и транспортировки вследствие появления термоупругих напряжений. К расчету приступают после выбора изоляции по электрической прочности.

Термоупругие напряжения достигают максимального значения на участках главной изоляции с минимальными радиусами кривизны, в местах с резким изменением толщины изоляции, на границе компаунда и деталей из твердых материалов с коэффициентом линейного теплового расширения и модулем упругости, отличными от характеристик компаунда.

Расчет выполняют в два этапа: на первом — производят

предварительный выбор толщины изоляции графоаналитическим способом; на втором — делают полный расчет термоупругих напряжений на участках с максимальными значениями эквивалентных напряжений, которые вычисляют по критерию прочности

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} \leq [\sigma] = \sigma_{\text{в.доп}}/k_{\text{э.м}}, \quad (8.3)$$

где  $\sigma$  — допустимое напряжение;  $\sigma_{\text{в.доп}}$  — временное сопротивление на растяжение при заданных условиях;  $k_{\text{э.м}}$  — коэффициент запаса, учитывающий влияние на прочность конструктивно-технологических, эксплуатационных и других факторов.

На первом этапе уточняют толщину межслоевой и главной изоляции, которые связаны зависимостями:

$$\delta_{\text{мсл}} = f(d_{\text{пр}}); \quad (8.4)$$

$$k_{\text{обм}} = f(k_{\text{к}}), \quad (8.5)$$

где  $\delta_{\text{мсл}}$  — толщина межслоевой изоляции;  $d_{\text{пр}}$  — диаметр провода обмотки;  $k_{\text{обм}}$  — коэффициент заполнения обмотки металлом;  $k_{\text{к}}$  — отношение площади поперечного сечения обмотки  $F_{\text{обм}}$  к площади поперечного сечения катушки:

$$k_{\text{обм}} = F_{\text{м}}/F_{\text{обм}}, \quad (8.6)$$

где  $F_{\text{м}}$  и  $F_{\text{обм}}$  — площадь сечения металла в обмотке и площадь поперечного сечения обмотки;

$$F_{\text{обм}} = l_{\text{обм}}b_{\text{обм}}, \quad (8.7)$$

где  $l_{\text{обм}}$  и  $b_{\text{обм}}$  — длина и толщина обмотки в рассматриваемом сечении.

Значение  $k_{\text{обм}}$  допускается определять по обмотке, имеющей наибольший коэффициент заполнения металлом:

$$k_{\text{к}} = \Sigma F_{\text{обм}}/F_{\text{к}}, \quad (8.8)$$

где  $\Sigma F_{\text{обм}}$  — суммарная площадь поперечного сечения всех обмоток;

$$F_{\text{к}} = l_{\text{к}}b_{\text{к}} \quad (8.9)$$

— площадь наименьшего поперечного сечения катушки ( $l_{\text{к}}$  и  $b_{\text{к}}$  — длина и толщина катушки в рассматриваемом сечении).

Уравнение (8.6) определяет жесткость самой обмотки. Выбор толщины межслоевой изоляции в зависимости от диа-

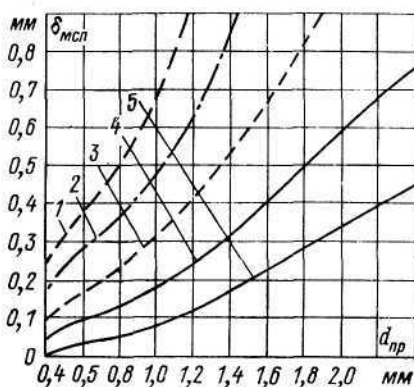


Рис. 8.1. Зависимость толщины межслоевой изоляции от диаметра провода (область, лежащая между кривыми 1 и 3, — предельная толщина; область между кривыми 3 и 5 — рекомендуемая)

1 — минимальная толщина межслоевой изоляции при  $k_{\text{обм}} = 0,6$ ; 2 — толщина межслоевой изоляции при  $k_{\text{обм}} = 0,55$ ; 3 и 5 — толщина межслоевой изоляции при  $k_{\text{обм}} = 0,4 \dots 0,5$ ; 4 — толщина межслоевой изоляции при  $k_{\text{обм}} = 0,45$

метра провода производят по кривым на рис. 8.1.

Выбор толщины межслоевой изоляции в рекомендуемой области графика, обеспечивающей коэффициент заполнения обмотки от 0,45 до 0,55 для проводов с большим диаметром, следует выбирать ближе к нижней границе области. Это делается с целью уменьшения жесткости обмотки, которая возрастает с увеличением диаметра провода.

Принимать значение  $k_{обм}$  меньшим 0,45 нецелесообразно, так как дальнейшее увеличение доли межслоевой изоляции незначительно уменьшает жесткость обмотки.

График зависимости  $k_{обм} = f(k_k)$  на рис. 8.2 учитывает деформации, возникающие из-за разности ТКЛР меди и компаунда. Если площадь поперечного сечения катушки неравномерная, то для получения запаса прочности принимают наименьшее значение  $S_k$ .

Выбор межслоевой и главной изоляции по графикам на рис. 8.1 и 8.2 производят последовательным приближением до получения данных, удовлетворяющих требованиям тех и других зависимостей.

Если выбранная толщина изоляции не соответствует диаграмме на рис. 8.2, следует или увеличивать толщину слоя изоляции, или уменьшать жесткость обмоток, или принимать другие меры, позволяющие снизить значения максимальных термоупругих напряжений или выбрать изоляционный материал с большей механической прочностью и меньшим коэффициентом линейного теплового расширения.

Одной из наиболее эффективных мер повышения механической прочности изоляции является армирование слоя компаунда.

Армирование слоя изоляции, прилегающего к обмотке с проводами большого сечения, удобно производить батистовой или стеклотентой, уложенной по образующей этой обмотки.

Наружные слои изоляции армируют металлическими сетками или проводящей и полупроводящей стеклотканью, а также миткалевой лентой. Тогда будет срабатывать также эффект буфера.

Уменьшение напряжения в компаунде достигается посредством армирования. Напряжение определяется из выражения

$$\sigma_k = \sigma_B / [(E'_m / E'_k)(S_m / S) + (S_k / S)], \quad (8.10)$$

где  $\sigma_B$  — термоупругие напряжения в изоляции;  $E'_m$ ,  $S_m$  и  $E'_k$ ,

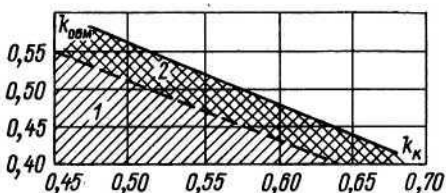


Рис. 8.2. Зависимость коэффициента заполнения обмотки металлом от отношения площади поперечного сечения обмотки к площади поперечного сечения катушки

1 — область допустимых значений; 2 — область рекомендуемых значений

$S_k$  — модуль упругости и площадь поперечного сечения армирующего материала и компаунда;  $S$  — площадь поперечного сечения изоляции.

Из выражения (8.10) следует, что напряжение в компаунде будет снижаться с ростом коэффициента упругости армирующего материала и с увеличением его площади поперечного сечения.

Таким образом, эффект армирования сказывается в снижении доли нагрузки, которая приходится на компаунд.

Важным для расчетов является также увеличение временного сопротивления на растяжение армированного слоя.

После конструкторской проработки изделия приступают к окончательному расчету механической прочности.

Механическая прочность литой изоляции катушки обеспечивается, если эквивалентные напряжения в опасных точках  $\sigma_{эkv}$  не превосходят временного сопротивления на растяжение  $\sigma_b$  или адгезионной прочности  $\sigma_a$  с учетом суммарного коэффициента запаса в соответствии с уравнением (8.3).

Временное сопротивление  $\sigma_{b, доп}$  принимают с учетом его значения в условиях, при которых производится расчет: заданных температуры и срока службы, условий нагружения и т. д. (см. гл. 4).

Для длительной эксплуатации, когда изоляция находится непрерывно в состоянии нагружения, сопротивление  $\sigma_{b, доп}$  будет составлять 60% кратковременного значения — при сроке службы до 10 тыс. ч и 50% — при работе в течение более 10 тыс. ч.

В условиях транспортировки, учитывая, что она может производиться при отрицательных температурах, когда нагружение возрастает,  $\sigma_{b, доп} = 0,85\sigma_b$ .

Снижение адгезионной прочности имеет ориентировочно такой же характер. Временное сопротивление на растяжение, которое имеет компаунд при кратковременных термоударах после изготовления, определяют, пользуясь зависимостью на рис. 4.4 с учетом времени, прошедшего после изготовления. Как было показано выше (см. гл. 4), изоляция при нормальной температуре окружающей среды находится в состоянии нагружения и процессы старения в ней протекают систематически. Суммарный коэффициент запаса прочности определяется из выражения

$$k_{з, м} = n_1 n_2 n_3 n_4, \quad (8.11)$$

где  $n_1$  — степень ответственности изделия (от 1,0 до 1,3);  $n_2$  — точность расчета (от 1,0 до 1,1);  $n_3$  — разброс характеристик компаунда (от 1,1 до 1,25);  $n_4$  — влияние среды на старение (от 1,1 до 1,3).

Выбор этих коэффициентов производится с учетом дополнительных факторов.

Для расчетов, погрешность которых имеет место только в сторону увеличения запаса прочности, коэффициент запаса  $n_1$  может не учитываться, так же как и коэффициент  $n_3$  — разброс характеристик компаунда, если эти характеристики принять по наилучшим значениям. Коэффициент степени ответственности выбирается с учетом качества изготовления и тщательности контрольных испытаний.

Влияние среды на старение может иметь весьма емкое содержание. В данном случае  $n_4$  учитывает только те факторы, которые могут повлиять с течением времени на механическую прочность и на образование термоупругих напряжений (см. гл. 3). Приведенные в главе данные свидетельствуют о необходимости творческого подхода к расчету электрической и механической прочности изоляции и важности экспериментального начала в процессе отработки конструкции, так как невозможно предусмотреть все технологические нюансы, которые могут отрицательно повлиять на изоляцию.

### В.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Оптимизация системы изоляции, достигнутая на основе предложенных критериев методами моделирования электрических полей, оказывается неэффективной, если на стадии проектирования не найдены оптимальные технологические способы осуществления заложенных идей с учетом индивидуальных особенностей конструкции.

Каждому виду изоляции присущи свои конструктивные особенности, связанные с оптимальным использованием электрофизических, физико-механических и технологических свойств материалов. Во многих случаях от технологичности изделия, т. е. возможности обеспечения заданных свойств изоляции на имеющемся оборудовании, зависит надежность эксплуатации изделия, его качество.

Например, влияние главной изоляции на конструкцию залитого эпоксидным компаундом трансформатора проявляется в зависимости от системы изоляции, от способов выполнения обмотки и фиксации ее в заливочной форме, т. е. в зависимости от способов создания изоляционных промежутков.

Все эти вопросы рассматриваются не только с учетом влияния на каждую конструкцию электрофизических и физико-механических свойств, методов выравнивания электрических полей, но и в зависимости от возможности обеспечения однородной структуры изоляции в процессе изготовления. Если это невозможно, то учитывается влияние возникающих неоднородностей на условия эксплуатации.

Влияние неоднородностей на качество изделия зависит от свойств примененных материалов и их геометрического расположения. Для изделий, изолированных эпоксидными компаун-



дами, такими неоднородностями могут быть неравномерные распределения пылевидного кварцевого песка, воздушные и инородные включения, отслоения, полости, трещины и т. п. Любые пустоты могут явиться местом скопления воздуха за счет диффузии его молекул между более крупными по своим размерам молекулами полимера.

Значительные неоднородности создаются на границе компаунда с другими материалами из-за неудаленных остатков пыли, жировых пятен и других загрязнений, из-за наличия воздушных включений на поверхности этих материалов.

На границе двух сред создаются также другие условия, ухудшающие эксплуатацию. На поверхности раздела накапливается заряд, что соответствует увеличению статической емкости изоляции на значение

$$\Delta C = [S\delta_1\delta_2/(\epsilon_1\delta_2 + \epsilon_2\delta_1)] [\epsilon_1\gamma_2 - \epsilon_2\gamma_1]^2/(\gamma_1\delta_2 + \gamma_2\delta_1)^2, \quad (8.12)$$

где  $S$  — площадь электродов;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — толщина изоляционных слоев, а  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  — проводимость и диэлектрическая проницаемость этих слоев.

Между двумя изоляционными материалами могут находиться инородные включения и воздушные полости. Распределение напряженности поля на границе двух сред обратно пропорционально значениям их диэлектрической проницаемости, а напряженность поля в пустотах  $E_2$  отличается от напряженности однородного диэлектрика  $E_0$  и определяется по формуле

$$E_2 = E_0/[1 - F(1 - \nu)], \quad (8.13)$$

где  $\nu = \gamma_2/\gamma_1$  — отношение комплексных проницаемостей;

$$F = x^2/(x^2 - 1) \{1 - [\arccos(1/x)]/\sqrt{x^2 - 1}\} \quad (8.14)$$

— коэффициент для полости, имеющей форму эллипсоида вращения, сплюсченного в направлении поля;

$$F = x^2/(1 - x^2) \{[\operatorname{arch}(1/x)/\sqrt{x^2 - 1}] - 1\} \quad (8.15)$$

— для эллипсоида, растянутого вдоль направления поля;  $x$  — отношение осей эллипсоида.

Из представленных уравнений следует, что напряженность электрического поля полости превышает напряженность идеального диэлектрика  $E_0$ . Частичные разряды при повышении напряжения возникают прежде всего в этих пустотах.

В изоляции наибольшая напряженность электрического поля возникает в точке, прилегающей к той части поверхности пустот, которые ближе к электродам:

$$E_{\max} = \nu E_0/[1 - F(1 - \nu)]. \quad (8.16)$$

Из этой формулы вытекает, что особую опасность в катушках трансформаторов представляют полости, расположенные на поверхности раздела провода обмотки и компаунда.

Наличие нормализованных технологий для отдельных типов твердых диэлектриков упрощает выбор способов изготовления, но одновременно ограничивает спектр конструкторских решений. Главными при разработке технологии являются вопросы совместимости используемых материалов в химическом и физико-механическом отношениях, способы обеспечения монолитности соединения закладных деталей с изоляцией, отсутствие локальных неоднородностей в изоляции и на ее поверхности. Все конструктивные решения, в свою очередь, должны способствовать выполнению операций выбранного технологического процесса с учетом характеристик имеющегося оборудования и изготавливаемой оснастки. Чем более отработана и надежна технология, тем в большей мере обеспечивается отсутствие брака и долговечность ИК. Как показывает многолетняя практика, стабильностью выполнения изделия можно добиться большего, чем незначительными преимуществами геометрических усложнений тела изолятора. Оптимизация изоляционных конструкций требует гармоничного сочетания всех трех стадий разработки: системы изоляции, конструкции и технологии.

В § 7.1 изложены основные конструктивно-технологические способы оптимизации выравнивания электрических полей при условии обеспечения монолитности диэлектрика с арматурой, минимизации коэффициента неравномерности электрического поля и термоупругих напряжений.

Решая задачу оптимизации технологии изготовления в общем виде, можно отметить наиболее существенные особенности для каждого из критериев:

$k_n \rightarrow 1$  достигается при методах производства, исключающих появление неоднородностей структуры внутри изоляции и на ее поверхности, т. е. при отсутствии раковин, инородных включений, отслоений, недопустимых нарушений чистоты обработки поверхности диэлектрика и арматуры, непредусмотренных выступах и заглаблениях;

$\sigma_b \rightarrow \min$  возможно при применении материалов с заложенными в расчетах равными значениями характеристик  $\alpha_1$ ,  $E'_m$ ,  $\mu$ , при отсутствии концентраторов механических напряжений за счет выступов и заглаблений в литевых формах или в пресс-формах или нарушений условий равномерности охлаждения при изготовлении;

$E_n$ ,  $S_{пов} \rightarrow \min$  будет иметь место при соблюдении в процессе изготовления расчетных форм и размеров поверхности тела изолятора;

$U_0 \rightarrow \max$  при соблюдении условий сопряжения внешних электродов с диэлектриком;

$E_{\text{туп}} \rightarrow \max$  в случае обеспечения заданной теплопроводности материала, отсутствии внутренних напряжений и трещин в процессе изготовления.

Универсальной оптимизации технологии изготовления любой конструкции предложить невозможно, так как она в значительной мере зависит от используемых материалов, конструктивных особенностей изделия и оснащенности производства.

## **ГЛАВА ДЕВЯТАЯ**

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

#### **9.1. КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Высокопотенциальные трансформаторы, у которых одна из обмоток при сравнительно небольшой разнице напряжений между своими выводами имеет большой потенциал относительно другой обмотки, находят широкое применение для питания ламп с бегущей волной, модуляторных, мощных импульсных и других или их сеток в различных газоразрядных приборах.

У трансформаторов тока первичная обмотка, связанная электрически с высоковольтной сетью, должна иметь надежную изоляцию относительно измерительной обмотки. Изоляция рассчитывается с учетом возможных грозовых перенапряжений в сети.

Классификация конструкций высокопотенциальных трансформаторов может производиться в зависимости от типа магнитопровода, типа изоляции или изоляторной части.

В серийно изготавливаемых конструкциях типа ТП (трансформаторы потенциальные) получили отражение некоторые тенденции зарубежного проектирования высокопотенциальных конструкций. В табл. 9.1 приведены основные конструктивные особенности трансформаторов мощностью от 6,3 до 182 В·А, с потенциалом от 3 до 55 кВ постоянного тока для сети 400 Гц и для сети 50 Гц.

В трансформаторах первой группы перед заливкой на магнитопровод наносится амортизационный слой из эластичного компаунда. Амортизация препятствует образованию в магнитопроводе механических напряжений, возникающих при усадке эпоксидного компаунда и при охлаждении его. Отсутствие защиты магнитопровода приводит к нарушению магнитной структуры трансформаторной стали и увеличению тока холостого хода в 1,5... 2 раза, а иногда и более.

Отрицательное влияние амортизационного слоя проявляется в сокращении полезной площади окна магнитопровода, ухудше-

Таблица 9.1

Тип конструкции	Рабочий потенциал, кВ	Способ герметизации	Тип магнитопровода	Изоляция		Крепление в заливочной форме	Число заливок
				высокопотенциальных вводов	между обмотками		
1	3	Обмотки залиты совместно с магнитопроводом	ШЛ	Кабель ПВСТ, ПВТФ-5	Волокнисто-эпоксидная (ЭИП-63А или ГСК)	Буксы в основном магнитопровода	Одна
2	6, 17	Залиты только обмотки	ШЛ и ПЛ	Локальная защита	Литой компаунд	Каркас сетевой обмотки	Две
3	17, 25, 30, 40, 55		ПЛ	Изолятор, усиленный ВВ кабелем			

нии на 5...10% удельных показателей объема и массы трансформаторов. Для нанесения слоя изготавливается оснастка. Появляется необходимость в дополнительных технологических операциях.

Межслоевая изоляция для всех классов напряжения и межобмоточная до 5 кВ выбираются в зависимости от рабочей температуры и срока службы. Бумажно-эпоксидная изоляция при температуре 125°С применяется для срока службы 5000 ч, а при 135°С — только 1000 ч. Для стеклослюдинита или пленки ПЭТФ срок службы вследствие большой короностойкости изоляции возрастает до 10 000 ч — при температуре 120°С и до 5000 ч — при 135°С.

Коэффициент заполнения окна магнитопровода медью  $k_m$ , который характеризует активное использование магнитопровода для трансформаторов типа ТП1, зависит от значения рабочего потенциала и, как видно из рис. 9.1, изменяется от 0,08 до 0,25. При увеличении типоразмера магнитопровода, который зависит также от габаритов высокопотенциального трансформатора, коэффициент заполнения окна медью улучшается.

Сетевая обмотка укладывается на каркасы из пресс-материала АГ-4С. В трансформаторах до 5 кВ между обмотками наносится бумага ЭИП-63А или слои гибкого стеклослюдинита ГСК толщиной 0,1 мм. Пропитка производится компаундом типа ЭПК-4, а заливка — типа ЭЗК-10.

При напряжениях выше 5 кВ в трансформаторах второго и третьего типа вся главная изоляция выполняется из литого компаунда методом двойной заливки.

Применение в трансформаторах первого типа материалов с хорошей впитывающей способностью и двойной заливки в

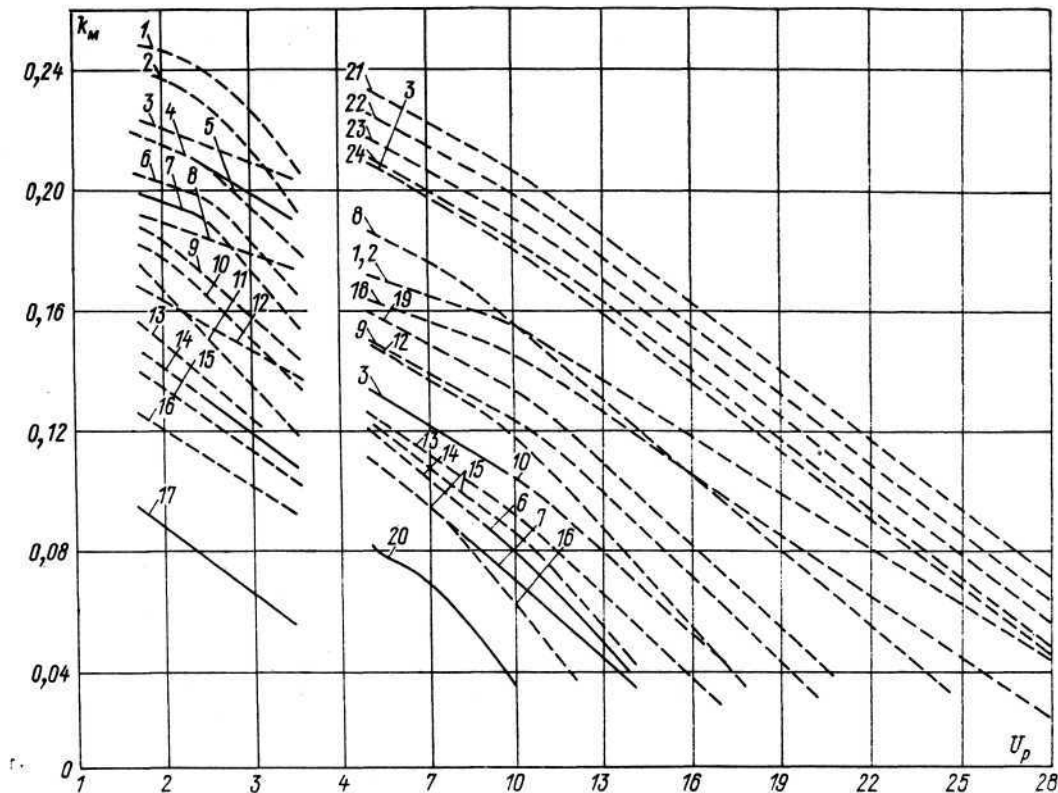


Рис. 9.1. Зависимость коэффициента заполнения окна медью от рабочего напряжения

1—ПЛ32×64×160; 2—ПЛ32×64×130; 3—ПЛ16,У\*; 4—ПЛ32×64×100; 5—ШЛ25×25(50); 6—ШЛ20×20; 7—ШЛ25×25(50); 8—ПЛ12,У\*; 9—ПЛ25×50×65(80); 10—ПЛ20×40×80(100); 11—ПЛ20×40×50(65); 12—ПЛ10,У\*; 13—ПЛ16×32×80; 14—ПЛ16×32×60; 15—ПЛ16×32×50; 16—ПЛ16×32×40; 17—ШЛ12/25; 18—ПЛ32×64×80; 19—ПЛ25×50×100(120); 20—ШЛ16×16(32); 21—ПЛ40×80×20; 22—ПЛ40×80×160; 23—ПЛ40×80×120; 24—ПЛ40×80×100

трансформаторах второго и третьего типа позволило исключить жесткие каркасы для намотки высокопотенциальной обмотки и обеспечить достаточно высокую однородность структуры главной изоляции.

Выводы высокопотенциальной обмотки до 5 кВ осуществляются высоковольтным кабелем, от 5 до 17 кВ — локальной защитой. При более высоких значениях потенциала выводы выполняются в виде изолятора, усиленного высоковольтным кабелем.

Щели между катушкой и магнитопроводом заливаются эластичным компаундом.

При напряжениях выше 5 кВ при заливке только обмоток, т. е. в трансформаторах второго и третьего типа, от внешней короны избавляются посредством металлизации катушки цинком толщиной 300 . . . 500 мкм.

Трансформаторы серии ТП надежно эксплуатируются в диапазоне температуры от  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ , при повышенной влажности, в условиях инея и росы, вибрационных и ударных нагрузках. Сравнительные удельные показатели объема трансформаторов серии ТП и серии АД фирмы «Огзилери Эквипмент Трансформерс» (Япония) приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Тип трансформатора	Мощность, В·А	Рабочий потенциал (ток постоянный), кВ	Габаритные размеры, м	Объем трансформатора, $\times 10^{-3}$ м <sup>3</sup>	Удельный объемный показатель, $\times 10^{-5}$ м <sup>3</sup> /(В·А)
ТП-1-20-200-50	182	17	0,138 $\times$ 0,124 $\times$ 0,198	3,4	1,87
АД-1644	200	20	0,216 $\times$ 0,102 $\times$ 0,143	3,16	1,6

Эта японская фирма выпускает 20 типонаименований высокопотенциальных трансформаторов серии АД мощностью 200, 500, 750 и 1000 В·А с эпоксидной изоляцией на рабочие потенциалы 10, 20, 30, 40 и 50 кВ постоянного тока. Трансформаторы имеют горизонтальное исполнение. Сетевая и высокопотенциальная обмотки заливаются раздельно.

При серийном исполнении такая конструкция имеет некоторые технологические и экономические преимущества, так как позволяет унифицировать сетевые и высокопотенциальные обмотки, изготавливать их заранее и быстро набирать их в различном сочетании в зависимости от спроса.

Удельные показатели при такой конструкции не могут быть оптимальными вследствие снижения коэффициента заполнения окна магнитопровода медью из-за появления дополнительной торцевой изоляции рядом расположенных высокопотенциальных обмоток.

Каталожные данные японской фирмы позволяют сравнить габаритные показатели эпоксидных серии АД и масляных се-



рии 1-Т высокопотенциальных трансформаторов одного назначения. Удельные показатели объема оксидных и масляных трансформаторов мощностью 1000 В·А фирмы «Огзилъери Ек-випмент Трансформерс» приведены в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Тип трансформатора	Рабочий потенциал (ток постоянный), кВ	Габаритные размеры, м	Объем трансформатора, $\times 10^{-3}$ м <sup>3</sup>
1-Т-30	30	0,254 $\times$ 0,304 $\times$ 0,432	33,4
АД-3063	30	0,280 $\times$ 0,230 $\times$ 0,240	15,4
1-Т-50	50	0,330 $\times$ 0,334 $\times$ 0,635	69,9
АД-3071	50	0,375 $\times$ 0,230 $\times$ 0,240	20,7

Из табл. 9.3 видно, что удельные объемные показатели масляных высокопотенциальных трансформаторов в 2...3 раза больше, чем показатели оксидных. Сравнительные удельные показатели массы масляных трансформаторов еще хуже.

Фирма «Балластрон» (США) разработала высокопотенциальный трансформатор накала для выпрямителя универсальной радионавигационной системы. В этом случае предъявлены жесткие требования к габаритам трансформатора. При рабочем потенциале 18 кВ изоляция рассчитана на электрическую прочность 26 кВ, а емкость вторичной обмотки относительно магнитопровода и сетевой обмотки не превышает 100 пФ. Трансформаторы имеют обычное для оксидной изоляции устройство.

Шесть высокопотенциальных обмоток такого трансформатора уложены на стеклоэпоксидный каркас, который затем заливается совместно с сетевой обмоткой, образуя моноблочную конструкцию. Отсутствие частичных разрядов при 15 кВ постоянного тока достигнуто посредством электростатических экранов.

Заливкой совместно всех шести высокопотенциальных обмоток и их размещением на одном магнитопроводе достигнуто значительное снижение габаритов по сравнению с вариантом отдельных трансформаторов накала для каждого вентиля выпрямителя.

От такой конструкции требуется повышенная надежность, так как выход из строя одной из накальных обмоток связан с заменой всего трансформатора.

Несмотря на повышенную сложность изготовления высокопотенциальных трансформаторов с шестью обмотками, достигается экономический эффект по сравнению с питанием выпрямителя шестью отдельными высокопотенциальными трансформаторами.

Описанная конструкция послужила основой для серии высокопотенциальных трансформаторов с оксидной изоляцией.

Широкий ассортимент высокопотенциальных трансформаторов, залитых оксидными компаундами, выпускается фирмой «Рейтон» (США). Заливаются только обмотки. Форма катушек характеризуется плавными линиями, без резких изменений толщины. Магнитопроводы в одно- и трехфазных конструкциях используются ленточные разрезные. Крепление трансформаторов производится буксами, залитыми в изоляцию катушки.

Фирмы «Анаконда» и «Ноутельфер» (США) заливают обмотки совместно с магнитопроводом в металлический кожух, который используется одновременно в качестве заливочной формы.

Магнитопроводы совместно с обмотками без применения кожуха заливаются фирмами США «Электрик Энджинерин», «Пермасел», «Пеумаси» и др.

Особую группу составляют высокопотенциальные трансформаторы, которые одновременно служат изоляторами для установки высоковольтных приборов.

## 9.2. БЛОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Высокопотенциальные трансформаторы блочной конструкции (трансформаторы-изоляторы) применяются для накала высоковольтных ламповых вентилях, управляемых вакуумных разрядников и различных высоковольтных устройств, смонтированных на панелях, выполненных в виде блоков, а иногда и крупногабаритных элементов радиоэлектроники, находящихся под высоким потенциалом относительно «земли».

Такие трансформаторы различаются формой изоляционной части: чащеобразной, с экраном-радиатором, тороидальной и др., или типом магнитопровода.

Особенностью тороидальных трансформаторов является размещение магнитопровода внутри обмоток. Это открывает широкие возможности выполнения различных типов высокопотенциальных изделий, в том числе блочной конструкции. Для этого на магнитопровод, уложенный в контейнер или изолированный пленочным негигроскопичным материалом, укладывают сетевую обмотку. Намотка многовитковой обмотки первой позволяет использовать станок, так как размеры окна магнитопровода не препятствуют проходу шнура с необходимой для укладки длиной провода.

Укладка высокопотенциальной обмотки поверх сетевой в тороидальных трансформаторах блочной конструкции позволяет использовать экранирующий эффект, создаваемый низковольтной обмоткой относительно острых кромок магнитопровода, и дает возможность размещать в окне трансформатора элементы, находящиеся под потенциалом самой накальной обмотки (рис. 9.2).

Этим достигается после укладки обмоток и изоляции наи-

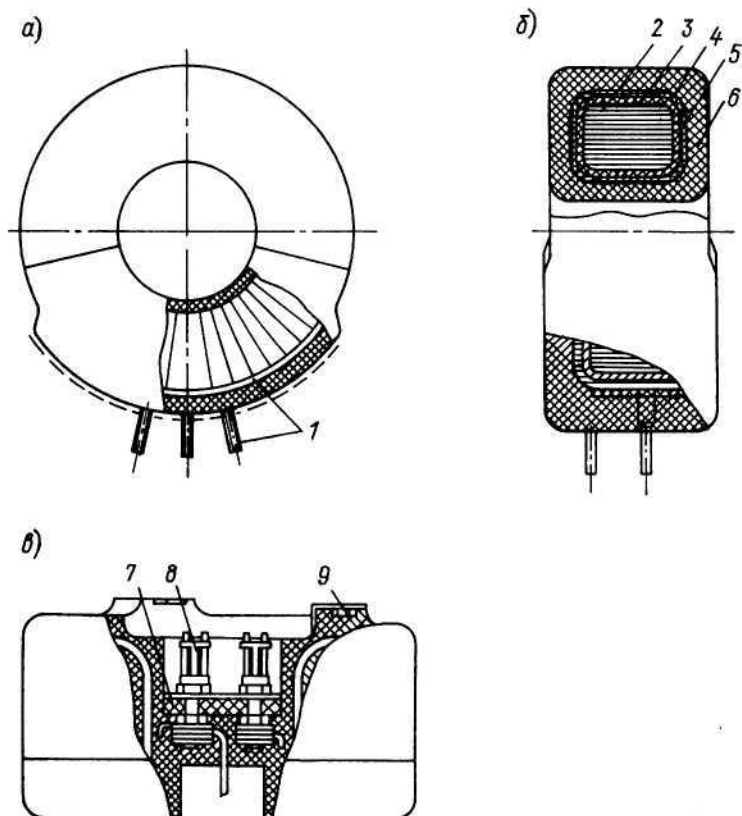


Рис. 9.2. Высокопотенциальный накальный тороидальный трансформатор блочной конструкции напряжением  $U_p=10$  кВ перед (а) и после (б) первичной заливки и его общий вид (в)

1 — колодка и выводы первичной обмотки НН; 2 — магнитопровод; 3 — контейнер; 4 — пленочная изоляция; 5 — обмотка НН; 6 — компаундная изоляция; 7 — панель; 8 — гнезда; 9 — букса

более полное использование свободного пространства окна трансформатора для установки в нем панели с ламповыми гнездами и резистором, создающим напряжение смещения на сетке тиратрона.

Для накальных обмоток с ограниченным числом витков при значениях тока, требующих применения проводов диаметром более 1 мм, в технологическом отношении оправдало себя использование мягких многожильных проводов марки ПЩО, более удобных в намотке по сравнению с одножильными проводами ПЭВ-2, ПЛШКО и др. Несмотря на больший диаметр, провод ПЩО обеспечивает меньший коэффициент выпучивания, что приводит к незначительному увеличению размеров намотки.

Накальная высокопотенциальная обмотка размещается в секторе, свободном от выводов сетевой обмотки. Крайние витки накальной обмотки надежно фиксируются на необходимом по электрической прочности расстоянии от низковольтных выводов.

Изоляция между обмотками может быть получена или намоткой по образующей тора ленты из бумаги ЭИП-63А, или заливкой компаундом. Лента для увеличения механической прочности складывается в два слоя краями внутрь.

Выравнивание толщины слоя бумаги наружного диаметра до толщины слоя бумаги внутреннего осуществляется нанесением на слой бумаги наружного дополнительного количества слоев бумаги ЭИП-63А. Количество выравнивающих слоев бумаги определяется исходя из отношения наружного диаметра к внутреннему после намотки первичной обмотки.

Наружная изоляция обеспечивается слоем литого компаунда. Компаунд служит также конструктивным материалом для крепления ламповой панели, высоковольтного вывода, букс для установки трансформатора и т. п.

Применение между обмотками литой изоляции требует двукратной заливки, двойного комплекта заливочных форм и т. д. Крепление трансформатора в заливочной форме производится подвеской за выводы сетевой обмотки, установленной на текстолитовой панели. Панель надежно закрепляется на сетевой обмотке.

Выводы сетевой обмотки размещаются по наружному диаметру, а накальной и поджига тиратрона — по внутреннему. При этом подсоединение выводов происходит непосредственно к зажимам ламповых гнезд и к высоковольтным выводам трансформатора.

Эти выводы надежно изолированы накидной текстолитовой гайкой с резиновой прокладкой, через которую проходит высоковольтный кабель внешнего монтажа.

Таким образом, после установки лампы, цоколь которой закрывает окно трансформатора с ламповыми гнездами и установленным между ними резистором смещения, на поверхности блочного трансформатора не остается открытых элементов, находящихся под высоким потенциалом.

Расположение высоковольтных элементов на блоке таково, что габариты трансформатора обеспечивают необходимое разрядное расстояние до ближайших заземленных деталей шкафа выпрямителя и выводов сетевой обмотки.

Для удобства эксплуатации ламповые гнезда делаются съемными. Это облегчает условия их чистки и делает возможной замену при обгорании. Одновременно они используются для закрепления контактов резистора смещения.

На верхнем торце трансформатора имеется прилив с встро-

енной буксой для установки замка, закрепляющегося на цоколе лампы.

Для крепления трансформатора используются четыре буксы, залитые в его выступах. Выступы не выходят за габариты трансформатора. Для лучшего сцепления с эпоксидной смолой буксы на поверхности имеют косую насечку.

Можно отметить достоинства тороидальной блочной конструкции.

Применение тороидального магнитопровода позволяет рационально использовать высокие магнитные свойства холоднокатаной текстурованной стали, а тороидальная конструкция трансформатора дает возможность надежно изолировать сетевую и накальную обмотку друг от друга и исключить необходимость значительной изоляции их от магнитопровода.

Все изложенное, а также отсутствие выводов высокопотенциальной обмотки через изолятор уменьшают габариты трансформатора.

Устранение с наружной поверхности трансформатора деталей, находящихся под высоким потенциалом, дает возможность устанавливать блочные трансформаторы в непосредственной близости друг к другу и к окружающим металлическим частям, не опасаясь поверхностного пробоя. Тем самым уменьшаются размеры выпрямителя. В то же время отсутствие незащищенных высоковольтных элементов увеличивает безопасность обслуживания выпрямителя. Сам трансформатор служит в качестве изолятора для установки и крепления вентиля.

Исключается необходимость крепления ламповой панели и нагрузки для создания напряжения смещения сетки, что упрощает конструкцию лампового выпрямителя и уменьшает его габариты, а также необходимость в высоковольтном монтаже между выводами накальной обмотки трансформатора, зажимами ламповой панели и другими элементами схемы.

Наряду с положительными свойствами тороидальные трансформаторы, и блочные в том числе, обладают некоторыми отрицательными, ограничивающими их широкое применение в силовой аппаратуре. Малые значения индуктивности рассеяния, которые имеют решающее значение для импульсных и высокочастотных трансформаторов, в силовых оборачиваются большими пусковыми токами. Шести- и десятикратные относительно номинального значения пусковые токи приводят к ложным срабатываниям максимальной и тепловой защиты. Возможны также в результате термического воздействия тока большой кратности разрушение межвитковой изоляции и образование короткозамкнутых витков. Размещение обмоток по всему периметру магнитопровода ухудшает условия его охлаждения конвекцией. Снижаются активные нагрузки на материал, что приводит к увеличению массы трансформатора.

Известны также недостатки технологического характера.

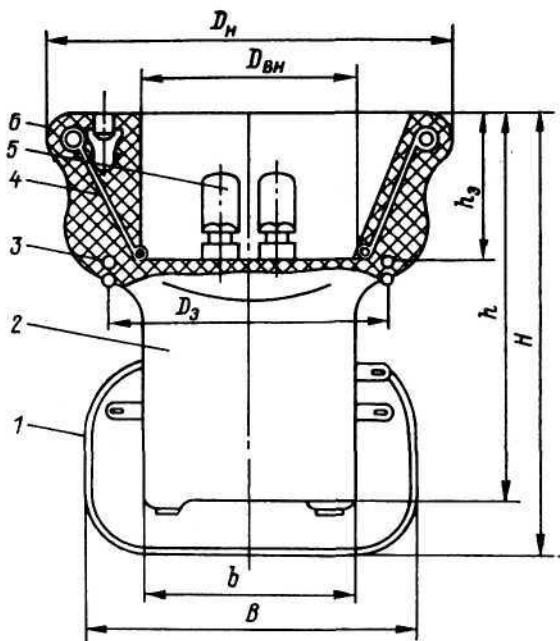


Рис. 9.3. Высокопотенциальный накаливаемый трансформатор блочной конструкции с чашеобразной изоляционной частью

1 — магнитопровод; 2 — катушка; 3 — заземленный электростатический экран; 4 — высокопотенциальный электростатический экран; 5 — ламповые гнезда; 6 — изоляционная часть

Небольшая производительность станков для тороидальной намотки, которая объясняется необходимостью перематывать обмоточный провод с бобины на шпулю и затем со шпули на трансформатор. При неоднократной перематке увеличивается возможность нарушения изоляции провода.

При отсутствии специальных станков возрастает доля ручного труда, связанная с укладкой провода большого сечения и шинки прямоугольной формы, с укладкой пленочной или бумажной межслоевой и межобмоточной изоляции. Эти трудности возрастают с увеличением мощности и напряжения трансформаторов.

Указанные недостатки отсутствуют в блочной конструкции высокопотенциальных трансформаторов накала на магнитопроводах типа ПЛ и ШЛ.

Оптимальные условия размещения таких трансформаторов в высоковольтных ламповых выпрямителях определяются использованием изоляционной части чашеобразной формы (рис. 9.3).

Вентиль или другой прибор, который питается от высокопотенциальной обмотки и имеет тот же потенциал, устанавлива-



ется непосредственно на катушке. Изоляторная часть чашеобразной формы локализует все элементы трансформатора и вентиля, находящиеся под высоким потенциалом относительно «земли». Равномерное электрическое поле на поверхности изоляторной части, а следовательно, и минимальные ее габариты достигаются методами моделирования электрических полей.

Установка высоковольтного тиратрона, газотрона или любого другого прибора непосредственно на залитую эпоксидным компаундом катушку делают размеры от основания трансформатора до верхней части прибора также минимальными. Величина изоляторной части не влияет на общие габариты трансформатора и вентиля, так как высота высоковольтного прибора, как правило, больше изоляторной части.

Чашеобразная форма изоляторной части позволяет точно и надежно подвешивать высокопотенциальную обмотку в заливаемой форме. Тем самым гарантируется высокая надежность сохранения заданных размеров внутренней и внешней изоляции.

Оптимальные размеры таких изоляторных частей обеспечиваются, если наружный диаметр  $D_n$  не превышает размеров длины магнитопровода с арматурой крепления  $B$  (рис. 9.3) и не меньше диагонали катушки, т. е. если выполняется условие

$$\sqrt{a^2 + b^2} \leq D_n \leq B, \quad (9.1)$$

где  $a$  и  $b$  — размеры основания катушки.

Неравенство (9.1) может быть ограничено условиями размещения внутри изоляторной части локализуемых однопотенциальных элементов, т. е. наименьшими размерами внутреннего диаметра  $D_{вн}$  и толщиной стенок изоляторной части. Толщина определяется длительной электрической прочностью компаунда и связана с допустимыми размерами диаметров высокопотенциальной обмотки и, особенно, заземленного экрана  $D_э$ . Диаметр  $D_э$  определяется построением развертки сопряжения катушки и изоляторной части методами начертательной геометрии.

Высота изоляторной части зависит от габаритов локализуемых однопотенциальных деталей и определяется удобствами визуального наблюдения за ламповыми гнездами и возможностью контроля за наличием напряжения на них.

Главная изоляция катушки имеет однородную структуру и минимальные термоупругие напряжения. Этому способствуют отсутствие каркасов из жестких материалов и прокладок из отвержденного компаунда, а также то, что заливка производится за один технологический цикл.

Сетевая обмотка уложена на слой переплетного картона и закрепляется в заливаемой форме на ее оправке (знаке), а высокопотенциальная обмотка подвешивается к крышке формы на выводы-шпильки (рис. 9.3). Высокопотенциальный экран

четко фиксируется в форме: нижнее кольцо экрана устанавливается в канавку текстолитовой панели трансформатора и сверху прижимается крышкой формы посредством тех же выводов-шпилек.

Буксы, которыми впоследствии будет крепиться в шкафах или блоках трансформатор, притягиваются винтами к дну формы. Винты имеют шайбы из фторопласта, который благодаря своей текучести служит буфером, снижая напряжения в компаунде при его усадке и при воздействии термоупругих напряжений.

Размеры и число залитых букс, в зависимости от массы

Таблица 9.4

Масса трансформатора, кг	Диаметр винта
До 1,5	M3...M4
1,5...3,5	M3...M4
3,5...7,5	M5
7,5...10,0	M6
10,0...21,0	M8

трансформатора и диаметра винтов выбираются по табл. 9.4 для нагрузок с ускорением до 500g.

В описанной блочной конструкции высокопотенциального трансформатора накала тиратрона основные требования проектирования изделий с равномерными электрическими полями, однородной структурой изоляции и с минимальными термоупругими напряжениями. В них также достигнуто гармоничное сочетание конструкции трансформатора и заливочной формы, методов крепления в ней обмоток, электростатических экранов и других элементов.

Компоновка высоковольтных радиотехнических устройств с высокопотенциальными трансформаторами блочного

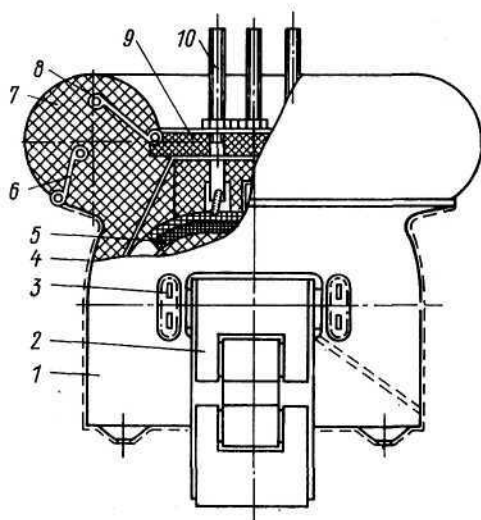


Рис. 9.4. Высокопотенциальный трансформатор блочной конструкции с тороидальной изоляционной частью для питания и изоляции высоковольтного устройства ( $P = 54 \text{ В} \cdot \text{А}$ ;  $U_p = 21 \text{ кВ}$ ;  $U_n = 50 \text{ кВ}$ )

1 — катушка трансформатора; 2 — магнитопровод с арматурой; 3 — выводы первичной обмотки; 4 — металлизация катушки; 5 — высокопотенциальная обмотка; 6 — заземленный электростатический экран; 7 — изоляционная часть катушки; 8 — высокопотенциальный электростатический экран; 9 — панель текстолитовая; 10 — выводы высокопотенциальной обмотки

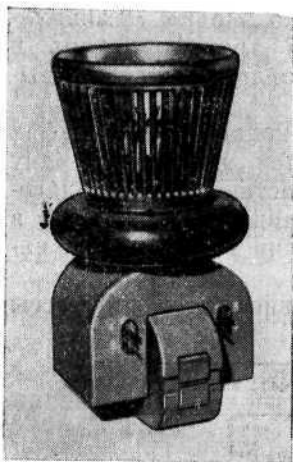


Рис. 9.5. Высокопотенциальный накальный трансформатор блочной конструкции с экраном-радиатором ( $U_p = 16$  кВ;  $U_n = 35$  кВ)

типа, имеющих не чашеобразную, а тороидальную изоляторную часть, дает такой же технический эффект.

На рис. 9.4 представлен один из вариантов таких трансформаторов. Форма изоляторной части и расположение электростатических экранов выбраны с учетом обеспечения равномерного электрического поля на поверхности.

Внешний диаметр определяется так же, как и диаметр в чашеобразной конструкции. Расстояние от центра, где размещены выводы высокопотенциальной обмотки, до заземленных экранов выбрано с учетом отсутствия короны при испытательном напряжении. Изоляторная часть обеспечивает внешнюю изоляцию и надежное крепление с помощью выводов-шпилек панелей с высоковольтными приборами, изолирует их относительно «земли» и избавляет от внешнего монтажа между трансформатором и прибором.

Трансформаторы с тороидальной изоляторной частью применяются для питания маломощных полупроводниковых схем.

Появление высоковольтных вентилях в металлокерамическом и металлическом исполнениях с повышенной механической прочностью и увеличенным сроком службы привело к появлению новых типов накальных высокопотенциальных трансформаторов с внешним электростатическим экраном-радиатором (рис. 9.5).

Особенностью указанных типов ламп является крепление их за баллон, температура которого достигает  $200 \dots 250^\circ \text{C}$ . Технические условия на металлокерамические вентили предусматривают установку их на специальные радиаторы и принудительное охлаждение.

Охлаждение баллона лампы осуществляет разработанный радиатор, который одновременно является электростатическим экраном, локализирующим высокопотенциальные выводы и детали конструкции лампы. Щели в экране-радиаторе увеличивают площадь охлаждения и обеспечивают дополнительное конвекционное охлаждение потоком более холодного воздуха, засасываемого через щели.

Для мощных ртутных тиратронов со стеклянным баллоном также требуется интенсивное охлаждение горловины лампы и крепление ее за цокольную часть, имеющую высокую рабочую температуру.

Во всех этих случаях употребляются трансформаторы блоч-

ной конструкции с электростатическим экраном-радиатором, размер которого определяется главным образом площадью охлаждения из выражения

$$S_p \geq [P_T / (t_T - t_0)] - S_T (\varphi_k - \varphi_T) / (\varphi_k - \varphi_p), \quad (9.2)$$

где  $P_T$  — суммарная мощность, выделяемая установленным на радиаторе тиратроном;  $S_T$  — площадь радиатора, омываемая конвективным потоком;  $t_T$  и  $t_0$  — температура тиратрона и окружающего воздуха;  $\varphi_k$  — конвективный коэффициент теплоотдачи;  $\varphi_T$  и  $\varphi_p$  — коэффициенты излучения для тиратрона и радиатора.

Выражение (9.2) получено из предположения, что тиратрон, имеющий надежный электрический и тепловой контакты с экраном-радиатором, охлаждается потоками, предварительно омывающими щели и внутреннюю поверхность радиатора.

Таблица 9.5

Место измерения	Температура охлаждения тиратрона, °С, установленного на		
	асбестоцементной панели	латунной панели ( $S_p = 100 \text{ см}^2$ )	экране-радиаторе трансформатора
Вывод „Катод“	190	180	120
Вывод „Анод“	130	120	110

В табл. 9.5 приведены сравнительные данные различных способов охлаждения импульсных тиратронов на 500 А, 16 кВ в зависимости от материала и конструкции радиатора, на котором они устанавливаются.

Из табл. 9.5 видно, что наиболее эффективным является охлаждение тиратрона посредством экрана-радиатора по сравнению с другими вариантами, в области вывода «Катод», с которым имеется непосредственный механический контакт.

Снижение температуры вентиля способствует увеличению срока его службы. Приведенная конструкция обладает также всеми положительными свойствами, характерными для других типов блочной конструкции трансформаторов.

Преимущества в габаритах и массе, которые дают высокопотенциальные трансформаторы накала с экраном-радиатором в трехфазных выпрямителях на тиратронах ТР1-40/15 (рис. 9.6), видны из табл. 9.6.

Таблица 9.6

Тип трансформатора	Число тиратронов	Габариты выпрямителя, м	Объем выпрямителя, м <sup>3</sup>
Со штыревым изолятором	12	$(2,4 \times 1,0 \times 2,2) \times 2$ $2,5 \times 1,1 \times 1,8$	10,2 5,0
Блочный	12		

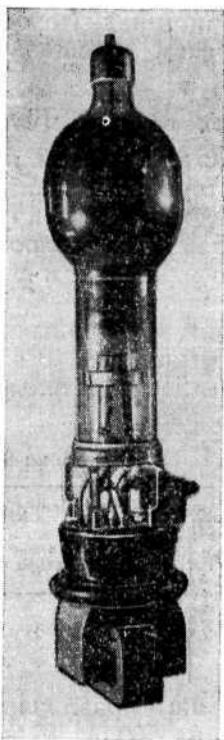


Рис. 9.6. Высокопотенциальный накальный трансформатор блочной конструкции с установленным тиратроном ТР1-40/15 ( $P = 350 \text{ В} \cdot \text{А}$ ;  $U_p = 15 \text{ кВ}$ ;  $U_n = 40 \text{ кВ}$ )

Из таблицы следует, что габариты выпрямителя, выполненного на блочных трансформаторах канала, в 2 раза меньше такого же выпрямителя на трансформаторах обычной конструкции. Помимо снижения габаритов, в новых выпрямителях улучшаются условия эксплуатации по температурному режиму, сокращается высоковольтный монтаж, упрощается конструкция шкафов и т. д. Получается значительный экономический эффект.

Появились также другие типы трансформаторов блочной конструкции, в которых ламповая панель установлена на конце двухреберной изоляторной части. Такая конструкция исключает необходимость высоковольтного монтажа между трансформатором и вентилем, но не дает существенного снижения габаритов блока, характерного для конструкций, у которых лампа устанавливается непосредственно на катушке. Сохраняется также разрядное расстояние относительно окружающих заземленных элементов и соседних вентилях. Увеличение высоты установки вентиля относительно основания крепления снижает механическую прочность заблокированной системы. Для установки вентиля увеличивается диаметр изоляторной части и неэкономично увеличивается масса трансформатора.

Трансформатор с юбочной изоляторной частью имеет преимущества по сравнению с предыдущей конструкцией, которая позволяет уменьшить габариты и массу. Юбоч-

ный изолятор обеспечивает изоляцию выводов высокопотенциальной обмотки относительно магнитопровода и выводов сетевой обмотки, но не дает возможности изолировать высокопотенциальные элементы трансформатора и вентиля от окружающих элементов. Усложняются условия изготовления, связанные с отливкой изоляторной части отдельно от катушки и последующей ее приклейкой к катушке. Место склейки является ослабленным в электрическом и механическом отношении.

### 9.3. ТРАНСФОРМАТОРЫ С МАЛОЙ ЕМКОСТЬЮ

Накальные высокопотенциальные трансформаторы с малой емкостью относительно сетевой обмотки и заземленных элементов, которую в дальнейшем будем называть емкостью транс-

форматора, применяются для уменьшения потери мощности сигнала в усилительных устройствах.

Задачи снижения емкости возникают также в трансформаторах, у которых высокий потенциал имеет повышенную частоту и в которых во избежание теплового пробоя требуется снижение диэлектрических потерь. Из выражения для определения диэлектрических потерь видно, что они пропорциональны емкости:

$$P = 2\pi f U^2 C \operatorname{tg} \delta, \quad (9.3)$$

где  $U$  — рабочий потенциал вторичной обмотки;  $C$  — емкость трансформатора;  $f$  — частота рабочего потенциала.

В обычных высоковольтных и высокопотенциальных трансформаторах малой мощности с электростатическими экранами и металлизированной поверхностью значение емкости составляет сотни и тысячи пикофард. Например, в трансформаторах серии ТНБВ емкость составляет от 100 до 200 пФ. В крупногабаритных трансформаторах мощностью до 50 кВ·А каждая катушка имеет емкость около 1000 пФ.

Задачи снижения емкости трансформатора  $C_x$  возникают при необходимости изменения ее значения от единиц до десятков пикофард.

Снижение емкости достигается уменьшением площади поверхности обмоток относительно друг друга и относительно магнитопровода, применением изоляции с минимальной диэлектрической проницаемостью и увеличением изоляционного промежутка. Данные положения следуют из уравнения для плоского конденсатора с двумя параллельными обкладками, которому можно приравнять емкости обмоток относительно друг друга и относительно магнитопровода:

$$C = 0,886 \varepsilon S / l, \quad (9.4)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость изоляции;  $S$  — площадь поверхности электродов;  $l$  — изоляционное расстояние.

В случае сложного диэлектрика емкость такого конденсатора определяется из уравнения

$$C = 0,886 \frac{S}{l_1/\varepsilon_1 + l_2/\varepsilon_2 + \dots + l_n/\varepsilon_n}. \quad (9.5)$$

Снижение емкости в трансформаторе осуществляется уменьшением числа витков в слое, преимущественным использованием воздушной изоляции или пористых материалов типа пентопластов с большим содержанием воздуха. Применяются также специальные конструктивные меры: укладка обмоток с небольшим количеством слоев «пирамидкой», секционирование обмоток, когда межслоевая емкость значительно превышает емкость между внутренним слоем обмотки и магнитопроводом, использованием обмоток обратной связи и т. д.



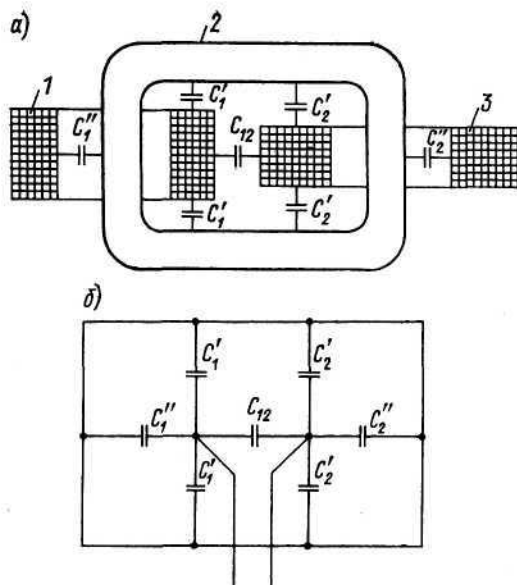


Рис. 9.7. Распределение емкости в трансформаторе с обмотками, разнесенными на разные керны (а), и эквивалентная схема (б)  
1 и 3 — обмотки; 2 — магнитопровод

Высокая эффективность снижения емкости достигается при размещении сетевой и высокопотенциальной обмоток на разных кернах, причем для них используется наиболее узкая часть магнитопровода. Тем самым участки обмоток, расположенных вне окна магнитопровода, максимально удалены относительно друг друга и относительно магнитопровода. Увеличение изоляционного расстояния между торцевой частью обмоток и острыми кромками магнитопровода, помимо улучшения электрической прочности, способствует также снижению емкости  $C'_2$  (рис. 9.7).

Емкость трансформатора, магнитопровод которого не заземлен, а обмотки разнесены на разные керны, можно определить из уравнения, полученного на основании упрощенной эквивалентной схемы (рис. 9.7):

$$C_x = C_{12} + [C_1 C_2 / (C_1 + C_2)], \quad (9.6)$$

где  $C_{12}$  — емкость между обмотками;  $C_1$  и  $C_2$  — емкость сетевой и высокопотенциальной обмоток относительно магнитопровода.

В соответствии с эквивалентной схемой емкости связи определяются из уравнений

$$C_1 = 2C'_1 + C''_1; \quad C_2 = 2C'_2 + C''_2. \quad (9.7)$$

Можно показать, что указанные емкости могут быть определены из следующих уравнений

$$C_1 = 1,76\varepsilon D_1 \{ (N_1 k_b \delta_1 b / \delta'_1) + [\omega_1 (a + b + 2\delta_1) / \delta'_1] k_y \}, \quad (9.8)$$

где цифрой 1 обозначены все символы, относящиеся к сетевой обмотке, а емкость  $C_2$  можно получить из аналогичного уравнения, в котором все входящие значения относятся к высокопотенциальной обмотке и имеют индекс 2;  $D$  — диаметр провода обмотки;  $N$  — число слоев в обмотке;  $\omega$  — число витков в слое;  $\delta$  — толщина межслоевой изоляции;  $a$  и  $b$  — ширина ленты и толщина навивки магнитопровода;  $k_b$  и  $k_y$  — коэффициенты выпучивания и укладки обмотки.

Значение емкости  $C_{12}$  определяется из уравнения

$$C_{12} = 0,0443 \{ [b + 2(\delta_2 + N_2 D_2 k_{2B} \delta_2)] D_2 \omega_2 k_{2y} + [b + 2(\delta_1 + N_1 D_1 k_{1B} \delta_1)] D_1 \omega_1 k_{1y} \} [(h_1 + h_2) / \varepsilon_1 + h_3 / \varepsilon_3]^{-1}. \quad (9.9)$$

Применение формул (9.8) и (9.9) дает погрешности в пределах 10...20%.

Оптимальный выбор изоляционных промежутков осуществляется с учетом целесообразности заземления магнитопровода. При этом определяется также возможность снижения емкости трансформатора при изолированном магнитопроводе.

Если магнитопровод не заземлен и находится под «плавающим потенциалом», то происходит перераспределение значений емкостей между обмотками и магнитопроводом, что, соответственно, приводит к перераспределению потенциалов. При равенстве этих емкостей потенциал магнитопровода относительно земли будет составлять половину значения приложенного к высокопотенциальной обмотке. Это создает предпосылки для уменьшения толщины изоляции высокопотенциальной обмотки относительно магнитопровода в конструкциях с напряжением выше 15 кВ. При более низких напряжениях, когда толщина слоя компаунда определяется главным образом технологическими соображениями или термоупругими напряжениями, изоляция магнитопровода от земли с целью применения более тонкого слоя компаунда для обмоток становится недостаточно эффективной.

При решении вопроса о целесообразности применения магнитопровода под «плавающим потенциалом» учитывается возрастание потенциала сетевой обмотки относительно магнитопровода и необходимость изоляции этой обмотки. Исследуется также размещение трансформатора и необходимость удаления от магнитопровода окружающих заземленных деталей.

На рис. 9.8 показан трансформатор накала мощностью 350 В·А с двумя высокопотенциальными обмотками напряжением по 25 В и потенциалом постоянного тока относительно

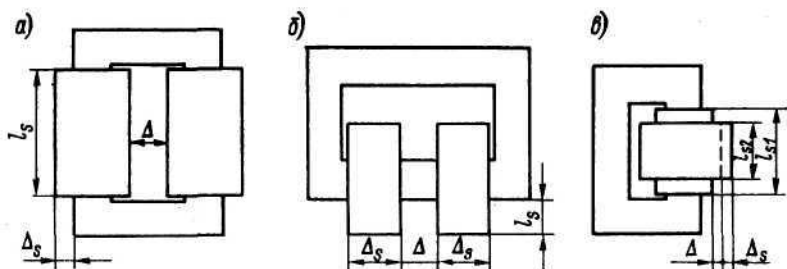


Рис. 9.8. Трансформаторы с обмотками, разнесенными на два керна (а), на одном горизонтальном кере (б) и concentрически расположенными на одном вертикальном кере (в)

сетевой обмотки 30 кВ с емкостью 20 пФ. Магнитопровод типа ПЛ изолирован от земли залитыми компаундом катушками. Крепление трансформатора производится буксами, залитыми в тело катушек.

Изоляционные промежутки выбраны с учетом распределения потенциалов обмоток относительно магнитопровода и относительно друг друга. Изоляторная часть высокопотенциальной обмотки имеет равномерное электрическое поле, рассчитанное методами моделирования электрических полей. Выравнивание электрического поля достигнуто изменением формы изоляторной части и заливкой в ее стенки электростатического высокопотенциального экрана.

Наличие заземленных экранов увеличивает емкость изделия. Применение экранов производится лишь в крайних случаях, при отсутствии других возможностей выравнивания электрического поля.

Сложность проектирования малоемкостных высокопотенциальных трансформаторов, обмотки которых разнесены на разные керна или разнесены другим образом относительно друг друга, связана с необходимостью уточнения коэффициента трансформации в зависимости от индуктивности рассеяния.

Расчет индуктивности рассеяния производится для каждой обмотки отдельно из уравнения

$$L_s = (0,4\pi\omega^2 l_{cp} \cdot 10^{-8}/l_s)\rho(\Delta/2 - \Delta_s/3), \quad (9.10)$$

где  $\omega$  — число витков в обмотке;  $l_{cp}$  — средняя длина витка;  $l_s$  — размер обмотки вдоль направления потока рассеяния;  $\Delta$  — расстояние между обмотками;  $\Delta_s$  — размер обмотки поперек линии потока рассеяния;

$$\rho = 1 - \delta + 0,35\delta^2, \quad (9.11)$$

— коэффициент Роговского ( $\delta = \Delta + \Delta_s/(\pi l_s)$  — коэффициент приведения толщины намотки к расчетной длине линий рассеяния). Определение размеров для расчета по уравнению

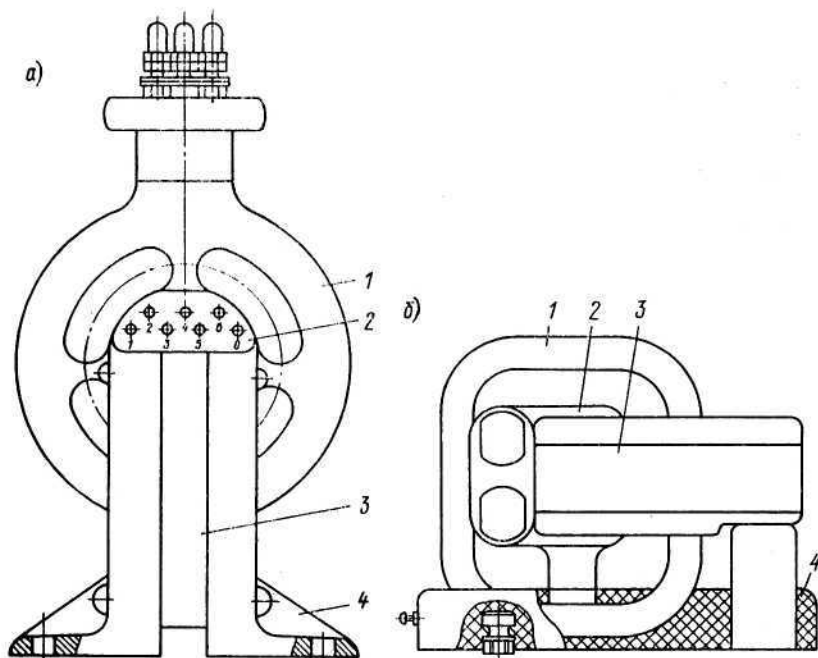


Рис. 9.9. Малоемкостные высокопотенциальные трансформаторы с воздушно-эпоксидной изоляцией на напряжение до 63 кВ (а) и до 25 кВ (б)  
 1 — высокопотенциальная (накальная) обмотка; 2 — сетевая обмотка; 3 — магнитопровод; 4 — основание

(9.10) в зависимости от размещения обмоток можно производить по рис. 9.8.

Индуктивность рассеяния обмоток всего трансформатора определяется из уравнения

$$L_s = L_{1s} + L_{2s}k^2, \quad (9.12)$$

где  $L_{1s}$  и  $L_{2s}$  — индуктивность рассеяния первичной и вторичной обмоток, а коэффициент трансформации определяется из выражения

$$k = U_1/U_2 \sqrt{1 - (I_1 \omega L_s / U_1)^2 100}, \quad (9.13)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — напряжение первичной и вторичной обмоток;  $I_1$  — ток первичной обмотки;  $\omega = 2\pi f$ .

На рис. 9.9, а изображен трансформатор малой емкости с воздушно-эпоксидной изоляцией, обмотки которого concentрически расположены на одном керне.

Увеличение емкости  $C_{12}$  между обмотками при concentрическом размещении, по сравнению с вариантом обмоток на разных кернах, происходит из-за роста площади обращенных друг к другу поверхностей обмоток.

Сетевая и высокопотенциальная обмотки трансформатора на рис. 9.9, а соединены между собой перемычками из эпоксидного компаунда, образованными одновременно с заливкой обмоток. Крепление высокопотенциальной обмотки во втором варианте малоемкостного трансформатора с изолированным от земли магнитопроводом (рис. 9.9, б) осуществляется заливкой части этой обмотки в основание, выполненное в виде массивной эпоксидной платы. Магнитопровод крепится на специальных выступах платы к залитой в эпоксидный компаунд сетевой обмотке. Этим усложнением конструкции достигается изоляция накальной обмотки до 25 кВ постоянного напряжения. Конструкция на рис. 9.9, а применяется при 40 и 63 кВ. Емкость высокопотенциальных обмоток этих трансформаторов относительно сетевой обмотки и «земли» не превышает 15 пФ, мощность 40, 100, 260 и 625 В·А, напряжение накала 6,3; 8; 10; 12,6; 15; 20 и 26 В.

Высокая механическая прочность таких конструкций позволяет им успешно выдерживать вибрационные и ударные нагрузки.

Выводы высокопотенциальной обмотки имеют максимальное удаление от магнитопровода. Краевой эффект их снижен сферическими гайками.

Трансформаторы типа СФТ японской фирмы «Флайбек» и «Трансформерс Калер» не обладают столь высокой механической прочностью, но более просты в изготовлении, так как первичная и вторичная обмотки заливаются раздельно. Вывод вторичной обмотки локализован резиновым колпачком с высоковольтным кабелем. Такая конструкция выводов сокращает габариты трансформатора и делает более надежным высоковольтный монтаж между трансформатором и высоковольтным прибором.

Накальные малоемкостные высокопотенциальные трансформаторы типа ТП-2, у которых первичная и вторичная обмотки залиты в моноблок эпоксидной изоляцией, характеризуются высокой механической прочностью.

Трансформаторы типа ТП-2 изготавливаются мощностью от 28,8 до 130 В·А на напряжение питающей сети 110, 115, 200 и 220 В с выходным напряжением 6,3; 12,6 и 26 В. Потенциал накальных обмоток относительно сетевой 3 и 10 кВ.

Необходимость увеличения межобмоточной изоляции с целью уменьшения емкости заставила использовать ленточные разрезные магнитопроводы типа ПЛВ с уширенным окном.

Первичная обмотка трансформатора типа ТП-2 выполняется из двух секций. Благодаря отводам, которые имеют секции, можно регулировать выходное напряжение в пределах  $\pm 8\%$ . Высокопотенциальная обмотка располагается concentric между секциями сетевой обмотки.

Межвитковая и межслоевая изоляция позволяет выдержи-

вать без пробоев двойное значение номинального напряжения. Надежность внешней изоляции достигнута благодаря заливке магнитопровода совместно с обмотками. Выводы высокопотенциальной обмотки выполнены высокочастотным кабелем.

Крепление трансформаторов производится тремя буксами, залитыми в эпоксидной изоляции основания конструкции.

В конструкции малоемкостного трансформатора фирмы «Рейтон» надежность внешней изоляции обеспечена благодаря большому разрядному расстоянию по поверхности изоляторной части и выравниванию электрического поля охранным кольцом вокруг вывода высокопотенциальной обмотки.

Катушка имеет простую форму с большими радиусами кривизны, которые также способствуют выравниванию электрического поля и снижению термоупругих напряжений в изоляции.

П-образный магнитопровод собран из пластин. Острые кромки магнитопровода экранированы давленными металлическими уголками П-образной формы, которые одновременно служат прижимными пластинами. Трансформатор соответствует требованиям технических условий МЛ-27А.

## ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ДРОССЕЛЕЙ

#### 10.1. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ СИЛОВЫЕ И АНОДНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Широкое распространение во всем мире получили силовые и анодные трансформаторы с литой изоляцией. Они характеризуются высокой импульсной прочностью, стойкостью к коротким замыканиям (КЗ), к климатическим и механическим воздействиям, к коронному разряду и химически активным веществам. Они также пожаро- и взрывобезопасны [34].

В конструктивном отношении их условно можно разделить на трансформаторы малой мощности (до 1000 В·А — для 50 Гц и до 5000 В·А — для 400 Гц), средней мощности (до 100 кВ·А) и большой мощности (до 500...700 кВ·А).

Трансформаторы первой группы применяются главным образом в блоках передвижной и стационарной радиоэлектронной аппаратуры. К ним предъявляются высокие требования по габаритам и массе. Ко второй группе трансформаторов при их установке в шкафах высоковольтных выпрямителей на передвижных установках или на столбах ВВ линий передачи также предъявляются требования по минимальным показателям объема и массы на единицу мощности.

Трансформаторы мощностью выше 100 кВ·А устанавливаются вне шкафов и блоков в виде выделенной аппаратуры в специ-



альных помещениях. Уменьшение размеров и массы этих трансформаторов осуществляется с учетом экономических и эксплуатационных факторов, включающих в себя капитальные затраты, стоимость эксплуатации, КПД и т. п.

В последние годы появились новые данные о различных методах герметизации не только трансформаторов малой мощности, но и мощных эпоксидных трансформаторов. Фирмы «Брентфорд» (Англия), «Смит» (Нидерланды) и другие, учитывая опыт эксплуатации, перешли от изготовления трансформаторов с пропиткой к залитым конструкциям для трансформаторов мощностью до 1600 кВ·А и подготовились к переходу на массовое изготовление трансформаторов мощностью 3 и 5 МВ·А с заливкой.

Катушки с пропитанными обмотками без последующей заливки, герметизированные снаружи тонким слоем эмали, лака или компаунда, имеют внутри изоляции большое количество пустот и полостей между витками и между слоями межвитковой или межобмоточной изоляции. Эти пустоты в случае проникновения водяных паров являются местом сбора конденсата. Опыт фирм «Вестингауз Электрик», «Хелестпост» и других показал недостаточную надежность при эксплуатации в условиях повышенной влажности трансформаторов с пропиткой вследствие проникновения влаги между пленкой герметизирующего компаунда и всем объемом слоистой изоляции.

Нарушение сплошности тонких герметизирующих покрытий вызывается уменьшением с течением времени механической и адгезионной прочности изоляционных материалов. Кроме того, слоистая изоляция повреждается вследствие коронных разрядов между слоями.

Использование высоковольтных трансформаторов с пропитанными обмотками без последующей заливки ограничивается также из-за недостаточной длительной электрической прочности изоляции вследствие разрушения ее частичными разрядами.

**Высоковольтные трансформаторы малой мощности.** Они изготавливаются методом обволакивания «фостерайт» (патент фирмы «Вестингауз») в кожухах из пресс-материалов или из алюминиевых сплавов с пропиткой и заливкой или только пропиткой компаундом, а также посредством пропитки и заливки компаундом в формах.

Метод обволакивания применяется для трансформаторов с выходным напряжением до 3...5 кВ и мощностью до 50...80 В·А. Так же как и герметизированные в кожухах, пропитанные эпоксидным компаундом трансформаторы, они имеют в продольной и главной изоляции большое количество пустот и полостей, которые могут стать местом образования частичных разрядов. Для предотвращения частичных разрядов требуется применение короностойкой продольной изоляции. Метод

напыления, так же как и герметизация в кожухах только трансформаторов с пропиткой, не избавляет от наличия зазора между магнитопроводом и катушкой, а следовательно, и от ионизационных процессов, так как псевдооживленный слой не проникает в щели толщиной 1...2 мм.

Изготовление трансформаторов с заливкой в кожухи позволяет отказаться от использования заливочных форм, тем самым резко снижая трудоемкость. Указанные преимущества исчезают по мере роста напряжения, что связано с невозможностью тщательного вакуумирования в кожухах. «Аббот» (США) ограничила серию трансформаторов в кожухах напряжением 5 кВ. Серия таких трансформаторов, удовлетворяющая требованиям MIL-T27, для сети напряжением 115 В, частотой 60 Гц выпускается на мощность 5...300 В·А, а на частоту 400 Гц — от 2 до 175 В·А.

Трансформаторы, выполненные с напылением, на 30% легче герметизированных в кожухах, а заливкой компаундом — на 20% их объем и масса меньше, чем в кожухах. С увеличением мощности и напряжения удельные показатели объема и массы трансформаторов в кожухах становятся хуже по сравнению с конструкциями с заливкой.

Особенности проектирования трансформаторов малой мощности связаны с трудностью обеспечения в небольших габаритах продольной и внешней изоляции.

Характерное для трансформаторов малой мощности использование обмоточных проводов диаметром меньше 0,2...0,3 мм нередко приводит к нарушению тонкой, механически непрочной изоляции обмоточного провода вследствие термоупругих напряжений, возникающих в эпоксидной изоляции в процессе изготовления и эксплуатации. В зависимости от жесткости компаунда и габаритов изделия минимальный диаметр проводов без применения дополнительных мер предосторожностей принимается 0,1 мм.

Тонкая изоляция обмоточных проводов малого диаметра быстрее разрушается под воздействием частичных разрядов. Особенно на углах прямоугольных катушек, где больше удельное давление на изоляцию провода, возникают большие термоупругие напряжения и чаще образуются пустоты вследствие худших условий пропитки и заливки.

Межвитковая изоляция на углах в крайних секциях больше подвержена разрушениям под воздействием перенапряжений, а малые размеры обмотки крайне затрудняют снижение перенапряжений выравниванием емкости.

Провода с малыми диаметрами и, следовательно, с большой напряженностью электрического поля нередко заставляют применять различные методы выравнивания полей. Большое количество витков и слоев в высоковольтной обмотке затрудняет проникновение компаунда, требует наличия между секциями

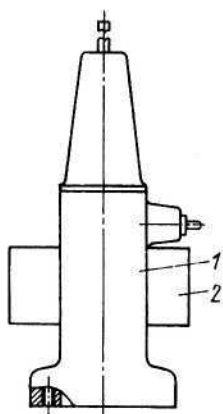


Рис. 10.1. Анодный высоковольтный трансформатор типа ТВ1 на рабочее напряжение 13,5 кВ  
1 — катушка; 2 — магнитопровод

промежутков шириной не менее 2 мм, достаточных для прохождения пропиточного и заливочного составов.

В малогабаритных высоковольтных изделиях внешняя изоляция обеспечивается заливкой обмоток совместно с магнитопроводом и выполнением выводов высоковольтным кабелем или с локальной защитой.

Сравнительно небольшая масса трансформаторов малой мощности и небольшие значения тепловой постоянной времени таких конструкций не способствуют созданию длительных и значительных перепадов температуры между внутренними и внешними слоями изоляции. Конкретное увеличение относительно непрерывного режима допустимой удельной мощности трансформатора при повторно-кратковременном режиме работы может быть определено умножением номинального тока нагрузки на коэффициент нагрузки  $k_n$ , который при включении и отключении потребителя определяется из выражения

$$k_n = I_{2 \text{ п-кр}} / I_{2 \text{ ном}} = \sqrt{\tau_n / [1 + (\tau_n - 1)n^2]}, \quad (10.1)$$

где  $I_{2 \text{ ном}}$  и  $I_{2 \text{ п-кр}}$  — ток вторичной обмотки в номинальном и повторно-кратковременном режиме;  $n = I_{2 \text{ ном}} / I_{2 \text{ п-кр}}$  — коэффициент загрузки во время паузы  $\tau_n$ ;  $\tau_n = \tau_p + \tau_n / \tau_p$  — скважность нагрузки ( $\tau_p$  — время нагрузки).

Температура максимально нагретой точки учитывается также при выборе режима обдува трансформатора. Увеличение снимаемой мощности для высоковольтных трансформаторов с принудительным обдувом и без него не должно превышать 1,5 раза.

Препятствием для чрезмерного увеличения удельной мощности при повторно-кратковременном режиме работы, так же как и в режиме работы с принудительным обдувом, помимо опасных тепловых процессов, является допустимое значение падения напряжения в обмотке.

Положительным для повышения технического уровня разработки и унификации явилось создание трансформаторов малой мощности серии ТВ1, составляющих ряд с выходными напряжениями 860, 1215, 1715, 2420, 3400, 4825, 6825, 9625 и 13 500 В, главная и внешняя изоляции которых рассчитана на удвоенный потенциал. Выпускаются трансформаторы на мощность от 30 до 2600 В·А для частоты 400 Гц (напряжение сети 115, 220 В) и от 30 до 1080 В·А — для 50 Гц (напряжение сети 127 и 220 В).

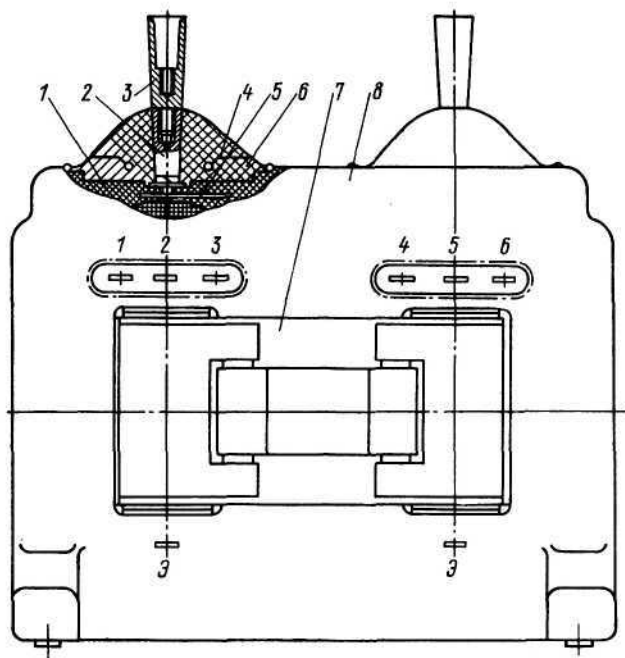


Рис. 10.2. Анодный высоковольтный трансформатор блочной конструкции на рабочее напряжение 8 кВ

1 — текстолитовая панель; 2 — вывод-экран высоковольтной обмотки; 3 — съемная контактная часть вывода-экрана; 4 — заземленный электростатический экран; 5 — высоковольтная обмотка; 6 — эпоксидная изоляция; 7 — магнитопровод; 8 — металлизация

Трансформаторы ТВ1 имеют четыре конструктивных типа, удовлетворяющих тем же климатическим и механическим требованиям. Различия высоковольтных и высокопотенциальных трансформаторов касаются только продольной изоляции, которая начиная с напряжения 1715 В осуществляется секционной намоткой. Между секциями расстояние 4...5 мм. На рис. 10.1 представлен такой трансформатор ТВ1, у которого сетевая и высоковольтная обмотки концентрически размещены на двух кермах и залиты в единый блок.

Другой вариант высоковольтного трансформатора с аналогичным размещением обмоток представлен на рис. 10.2. Трансформатор имеет горизонтальное расположение ленточного разрезного магнитопровода и крепление посредством четырех букв, залитых в катушку. Открытая изоляционная часть с равномерным электрическим полем имеет механически прочный вывод-экран, приспособленный для установки на нем выпрямителя на полупроводниках. На рис. 10.3 показан высоковольтный импульсный генератор напряжения медицинской установки для лучевой терапии с блочными анодными и накальными трансформаторами тиратрона ТГИ1-500/16. Благодаря такой кон-

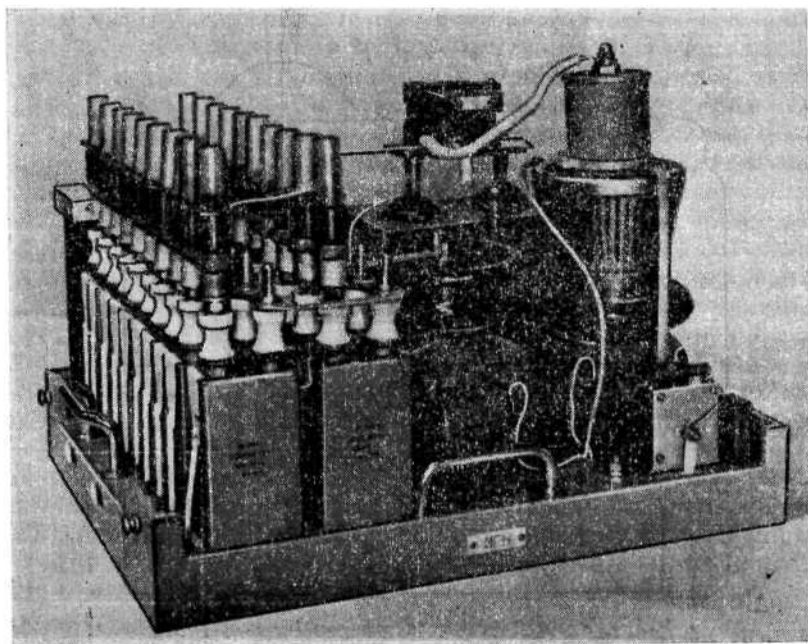


Рис. 10.3. Блок импульсного генератора напряжения

струкции трансформаторов в установке отсутствуют изоляторы и другие изоляционные детали, чем снижаются габариты в 1,5... 2 раза.

Высоковольтный трехфазный трансформатор на линейное напряжение вторичной обмотки 25 кВ (рис. 10.4) также имеет горизонтальное расположение магнитопровода. Установка его производится за арматуру магнитопровода. Металлизированная поверхность катушек позволяет размещать их вблизи заземленных элементов.

Изоляторная часть грушевидной формы имеет равномерное электрическое поле.

Главная изоляция анодного трансформатора (рис. 10.2 и 10.4) выполнена однократной заливкой при обмотке, закрепленной методом подвески. Для увеличения электрической прочности внешней изоляции сверху панели при заливке образуется изоляционный слой компаунда.

Промежуток между панелью и внутренними стенками формы, который необходим для образования заданной толщины слоя компаунда, регулируется посредством трех штырей, выступающих из формы и упирающихся в каждую панель.

На рис. 10.5 показан общий вид трансформаторов фирмы

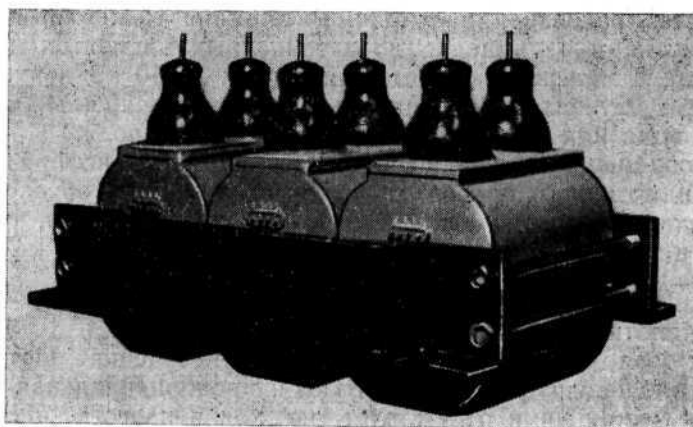


Рис. 10.4. Трехфазный анодный высоковольтный трансформатор мощностью 2200 В·А (напряжение поверхностного пробоя изоляционной части 60 кВ)

«Федерал Пасифик Электрик» (США) на напряжение 4, 6, 10, 15 и 20 кВ, мощностью от 30 до 5500 В·А. Обмотки располагаются концентрически на одном керне. Магнитопробод шихтованный.

Большое разнообразие зарубежных конструкций в значительной мере объясняется наличием оборудования у фирм. Серийное производство трансформаторов малой мощности и субминиатюрных с эпоксидной изоляцией освоено десятками фирм США и Японии. Имеются такие фирмы в Канаде, Англии, ФРГ, Франции и в других странах.

**Высоковольтные трансформаторы средней мощности.** С ростом мощности трансформаторов, увеличения площади сечения провода обмотки и толщины изоляции повышается механическая и электрическая прочность межвитковой изоляции. Размеры катушек не препятствуют выравниванию электрического поля

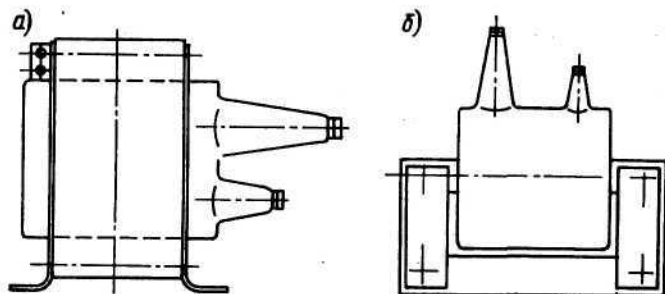


Рис. 10.5. Анодные высоковольтные трансформаторы с горизонтальным (а) и с вертикальным (б) расположением изоляционных частей



в изоляции и емкости обмотки, что позволяет повысить общую прочность продольной изоляции. Расстояния между выводами ВВ обмотки и от выводов до заземленных элементов принимают такие значения, которые в изделиях до 10 кВ допускают во многих случаях выполнение их лепестками и шпильками без локализации или выравнивания электрического поля.

Одновременно с увеличением мощности трансформатора, массы намоточного провода и толщины изоляции, обусловленных механическими и технологическими требованиями, растут потери в меди:

$$P_m = 2,7j^2m_m, \quad (10.2)$$

где  $j$  — плотность тока;  $m_m$  — масса меди обмотки.

Несмотря на квадратичный закон увеличения плотности тока и площади поверхности катушки, пропорциональная зависимость между ними отсутствует, так как в качестве площади охлаждения принимается не вся поверхность катушки, а только открытая ее часть. Во избежание значительного уменьшения плотности тока в обмотке и нерационального расхода меди с ростом мощности трансформатора целесообразно увеличивать площадь охлаждения.

Кроме того, с возрастанием объема эпоксидной изоляции ухудшаются условия охлаждения обмоток. Это приводит к увеличению температурных градиентов и термоупругих напряжений в изоляции. Усложняется также технологический процесс одновременной заливки обмотки низшего и высшего напряжений в одной катушке. Рост охлаждающей поверхности и упрощение технологии достигаются заливкой каждой из обмоток отдельно. Между ними создается воздушный канал. Распределение напряженностей электрического поля в такой комбинированной, воздушно-эпоксидной изоляции зависит от толщины эпоксидного слоя и воздушного канала. Техничко-экономическая эффективность такой конструкции видна из сравнительных данных трансформаторов мощностью 10...63 кВ·А, выполненных со сплошной эпоксидной изоляцией и воздушно-эпоксидной (табл. 10.1). При мощностях, меньших 10к В·А, на частоте 50 Гц применение воздушных каналов малоэффективно, так как увеличивает массу и габариты конструкции.

Несмотря на улучшение условий охлаждения обмоток, плотности тока в трансформаторах до 10 кВ·А не могут быть значительно увеличены из-за допустимых падений напряжения в выпрямителе, которые в большинстве случаев для анодных трансформаторов не должны превосходить 3...4%.

Расход меди при воздушно-эпоксидной изоляции снижается по сравнению с вариантом сплошной изоляции от 20...40% до нескольких раз, а стоимость годовых затрат — на 7...8%.

Для напряжений 5...8 кВ, независимо от совместной или раздельной заливки каждой из обмоток, может быть использо-

Таблица 10.1

Наименование характеристики	Значение характеристики трансформатора мощностью					
	10 кВ·А ( $U_p=10$ кВ)		25 кВ·А ( $U_p=15$ кВ)		63 кВ·А ( $U_p=20$ кВ)	
	Сплошная эпоксидная	Воздуш- но-эпок- сидная	Сплошная эпоксидная	Воздуш- но-эпок- сидная	Сплош- ная эпоксид- ная	Воздуш- но-эпок- сидная
Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	1,19 <u>1,57</u>	1,39 <u>3,02</u>	0,86 <u>1,14</u>	1,1 <u>2,61</u>	0,81 <u>0,99</u>	1,04 <u>2,23</u>
Масса меди, кг	17,55 <u>17,31</u>	15,32 <u>11,27</u>	63,50 <u>63,90</u>	33,65 <u>21,70</u>	124,40 <u>127,0</u>	61,34 <u>44,52</u>
Температура пере- грева, °С	39,0 <u>39,0</u>	40,0 <u>40,2</u>	38,5 <u>38,5</u>	39,7 <u>40,5</u>	41,2 <u>41,2</u>	39,6 <u>39,8</u>
Потери в меди, Вт	181,1	358,9	353,7	509,0	567,5	776,3
Масса стали, кг	59,52	55,4	110,7	117,1	141,0	285,5

Примечание. В числителе характеристика первичной обмотки, в знаменателе — вторичной.

вана бумажно-эпоксидная изоляция. При больших напряжениях обычно принимается литая изоляция.

Таблица 10.2

Высота катушки, мм	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	Ширина канала, мм
150	0	6
	4,5	6
	6,5	8
	7,25	10
	7,75	14
	8,20	20
	8,20	30
300	0	3,6
	3	6,0
	4,5	8,0
	5,6	12,0
	6,1	16,0
	6,4	22,0
	6,5	30,0
6,65	40,0	
450	0	3,0
	2	4,0
	3,1	5,0
	5,0	8,0
	5,6	10,0
	6,5	16,0
	6,6	20,0
6,75	30,0	

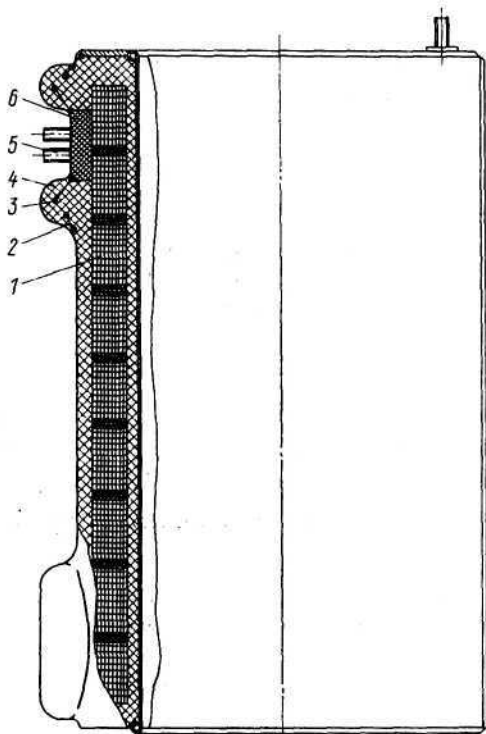


Рис. 10.6. Высоковольтная катушка анодного трансформатора  
 1 — секция обмотки; 2 — заземленный электростатический экран; 3 — высоковольтный электростатический экран; 4 — изоляционная часть; 5 — выводы обмотки; 6 — текстильная панель

Ширина воздушного канала между обмотками выбирается с учетом условий охлаждения (табл. 10.2) и электрической прочности.

Из табл. 10.2 видно, что для высоты катушки 150 мм ширина канала больше 10... 14 мм не дает значительного увеличения коэффициента теплоотдачи, а для высоты 300 мм и более — шире 22 мм.

На рис. 10.6 приведена П-образная катушка трехфазного трансформатора мощностью 50 кВ·А с питанием от сети напряжением 380 В, частотой 50 Гц, обмотки которого выполнены с воздушно-эпоксидной изоляцией. По внутреннему диаметру высоковольтной катушки и ее торцам компаунд армирован латунной сеткой, края которой завальцованы вокруг провода круглого сечения. Сетка служит для упрочнения компаунда и в качестве электростатического экрана.

Применение экрана исключает появление короны в воздушном канале и на торцах около магнитопровода.

По наружному диаметру катушка металлизирована цинком до основания изоляторной части кратерного типа, рассчитанного на поверхностный пробой при напряжении 57 кВ.

Такая изоляторная часть позволяет удобно разместить внутри нее отводы вторичной обмотки, имеющие разность напряжений 1,5... 2 кВ, и надежно закрепить панель с выводами в заливочной форме.

На противоположной от выводов стороне катушка имеет еще две технологические панели, которые совместно с панелями изоляторных частей обеспечивают закрепление обмотки в заливочной форме методом подвески.

Выбранная конструкция изоляторной части позволяет использовать для внешней изоляции слой компаунда без резких изменений его толщины. Небольшая высота изоляторной части снижает разнотолщинность и способствует уменьшению термоупругих напряжений в компаунде. Выравнивание электрического поля на поверхности изоляторной части обеспечивается выбором формы компаунда, высоковольтного и заземленного электрических экранов, залитых в изоляторе.

Разработан высоковольтный анодный трансформатор с питанием от сети напряжением 220 В, частотой 400 Гц, у которого ширина воздушного канала между обмотками выбрана с учетом отсутствия короны без металлизации вторичной катушки.

Исключение металлизации упрощает изготовление катушек и снижает влияние на электрическую прочность мелких дефектов в наружном слое изоляции.

Отрицательной стороной такого решения является увеличение в 2... 3 раза, по сравнению с необходимым по условиям охлаждения, ширины воздушного канала. Рост диаметра высоковольтной обмотки приводит к увеличению средней длины окружности витков, к большему расходу меди и к большим джоулевым потерям в ней.

Одновременно с ростом диаметра обмотки и окна для ее размещения увеличивается масса магнитопровода и потери в стали, которые для частоты 400 Гц могут быть весьма значительными.

Д. И. Петровскому удалось найти такое соотношение параметров конструкции, которое позволило уменьшить расход меди на 25... 30% по сравнению с вариантом сплошной изоляции обмоток.

Первичная и вторичная обмотки наматываются на стеклоэпоксидные точечные каркасы.

Выводы первичной обмотки посредством приливов сложной формы выводятся на торец трансформатора. Выводы высоковольтной вторичной обмотки разносятся на разные стороны катушки и размещаются в углублении приливов.

Дальнейшим развитием такой конструкции анодного транс-

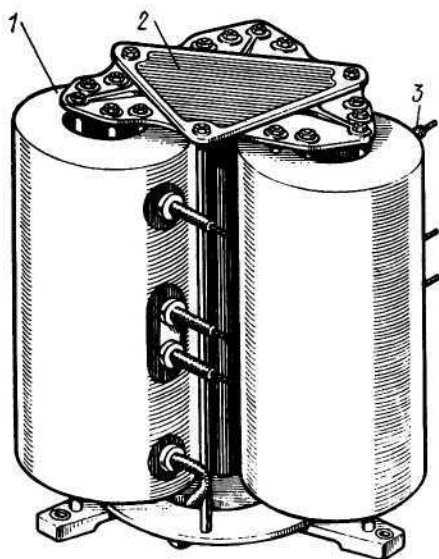


Рис. 10.7. Трехфазный высоковольтный анодный трансформатор объемной конструкции

1 — катушка; 2 — арматура крепления; 3 — высоковольтные выводы

Аналогично блочным трансформаторам накала исключаются разрядные промежутки между трансформатором и мостом выпрямителя, сокращается высоковольтный монтаж и исключается необходимость в дополнительных изоляционных конструкциях для установки диодов.

Так как контакт между секциями производится снаружи катушки, то появляется возможность уменьшить толщину изоляции катушки.

С учетом приведенных факторов блочная конструкция приводит к резкому сокращению массы и габаритов высоковольтного выпрямителя.

Другой возможностью значительного сокращения габаритов, и особенно массы, трансформаторов является использование теплостойких материалов на класс изоляции Н или F.

Применение теплостойких проводов, прокладочных материалов и теплостойких пропиточно-заливочных компаундов ТКП-2 и ТКЗ-2, ЭТЗ-16 при размещении катушек на трехфазном объемном ленточном магнитопроводе (рис. 10.7) позволило при условии принудительного охлаждения потоком со скоростью не менее 3 м/с разработать трансформатор мощностью 7,2 кВ·А высотой 252 мм, диаметром 251 мм. Масса его около 20 кг.

Трансформатор имеет две высоковольтные обмотки по 5 кВ,

форматора явилась разработка высоковольтного преобразователя (трансвентили), у которого кремниевые лавинные диоды «размазаны» по поверхности катушки. Трансвентили мощностью 6,3; 10; 16; 25 и 40 кВт преобразуют переменный трехфазный ток напряжением 220 В и частотой 400 Гц в постоянное напряжение от 10 до 50 кВ. Залитые в компаунд блоки диодов устанавливаются каждый на отдельную секцию обмотки. Выводы секций выполнены буксами, залитыми в наружном слое компаунда. Электрическое соединение секций и отдельных блоков производится посредством внешнего монтажа.

В этом случае, так же как и в трансформаторах блочной конструкции, источник питания и прибор совмещаются по однопотенциальному признаку.

которые находятся под потенциалом 17 и 27 кВ постоянного напряжения. Для изоляции выводов использован теплостойкий высоковольтный кабель.

С целью снижения термоупругих напряжений и массы сетевая обмотка выполнена из алюминиевой фольги, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) которой близок по значению к ТКЛР компаунда. Высоковольтные обмотки намотаны из медного провода с теплостойким покрытием.

Арматура крепления трансформатора сделана из алюминиевых сплавов. Для снижения площади поперечного сечения и массы магнитопровода использована трансформаторная сталь с высокими магнитными характеристиками.

Все указанные меры привели к снижению массы такого трансформатора почти в 3 раза по сравнению с массой трансформатора обычного исполнения, рассчитанного на температуру перегрева 40...50°С.

Использование такого трансформатора в радиоэлектронной аппаратуре требует локализации влияния его интенсивного теплового излучения на окружающие приборы. Приходится мириться с пониженным КПД трансформатора и большим падением напряжения в обмотках. Изготовление его связано с тщательной обработкой технологии.

**Высоковольтные трансформаторы большой мощности.** В таких трансформаторах литая эпоксидная изоляция первоначально применялась при мощности 100, 250, 400 и 630 кВ·А. Постепенное увеличение мощности объясняется сложностью процесса заливки крупногабаритных катушек, отсутствием необходимого технологического оборудования и, главным образом, отсутствием методов борьбы с большими термоупругими напряжениями, возникающими в эпоксидной изоляции при изменении температуры и при коротких замыканиях.

Сравнительно большой коэффициент заполнения объема залитой катушки медью ( $k_k = 0,5$ ) и большая разность температурных коэффициентов линейного расширения меди и компаунда приводили к различным нарушениям сплошности изоляции.

Сближение значений ТКЛР активных материалов обмоток и компаунда получено благодаря применению фольги или проводов из алюминия. Снижение термоупругих напряжений в результате уменьшения объема компаунда в залитом изделии достигается раздельной заливкой обмоток НН и ВН, а улучшение условий охлаждения — наличием воздушного канала между ними.

Применение ленточной спиральной обмотки из алюминия удовлетворяет также требованиям динамической и термической стойкости при коротких замыканиях. Найдено, что при использовании обмотки из алюминия термоупругие напряжения в компаунде при изменении температуры на 1°С меньше на 20%,



чем при использовании медной обмотки.

Большая поверхность соприкосновения ленточного проводника с изоляцией способствует увеличению теплопроводности, что также снижает термическое воздействие короткого замыкания на изоляцию. Электродинамический удар при коротком замыкании менее опасен в момент эксплуатации, чем в момент включения, поскольку нагретый заливающий компаунд находится в высокоэластическом состоянии и благодаря большой релаксационной способности лучше воспринимает кратковременные термоупругие напряжения.

Применение ленточной обмотки из тонкой фольги способствует также лучшему распределению тока по поверхности цилиндрического сечения обмотки. Известно, что в многослойных цилиндрических катушках, намотанных по спирали, при протекании в них переменного тока каждый из витков внутренних слоев находится в сильном магнитном поле, создаваемом всеми витками внешних слоев. Возникающие под воздействием этого поля вихревые токи создают дополнительные потери, которые пропорциональны четвертой степени толщины проводников в радиальном направлении. Эти потери могут возникать, когда явления поверхностного эффекта еще не сказываются.

Напряжения при воздействии импульсов линейно распределяются по отдельным виткам и имеет для спиральной намотки из фольги неизменное импульсное напряжение на виток. Учитывая незначительное импульсное воздействие на межвитковую (межслоевую) изоляцию, можно уменьшить ее толщину. В спиральной обмотке она выбирается в большинстве случаев по механической прочности.

Приведенные принципы проектирования послужили основой для производства фирмой АЕГ высоковольтных трансформаторов с литой эпоксидной изоляцией типа «Джифал». Фирмой освоены трансформаторы мощностью до 1600 кВ·А, и она готова поставлять изделия мощностью до 4000 кВ·А на класс изоляции 10, 20 и 30 кВ. Трансформаторы имеют шихтованные магнитопроводы с косыми стыками. Обмотки НН и ВН наматываются и заливаются отдельно. Между обмотками имеется воздушный канал, диаметр которого выбирается с учетом скорости охлаждения и отсутствия коронирования.

Алюминиевая фольга или лента наматывается вместе с изолирующей полимерной пленкой, образуя спиральную обмотку, в которой в каждом слое по одному витку и на витковую изоляцию не действует двойное напряжение. Электрическое соединение отдельных катушек осуществляется методом холодного прессования или сваркой в атмосфере защитного газа.

После установки в форму катушку сушат в вакууме и заливают компаундом.

Большая механическая и электрическая прочность эпоксидной изоляции позволяет осуществлять выводы обмоток НН и

ВН непосредственно шиной. Исключается использование специальной зажимной доски и изоляторов.

Для трансформаторов типа «Джифал» принят класс изоляции В.

Надежная защита от повышенной влажности, высокая стойкость при коротких замыканиях и перенапряжениях привели к широкому применению мощных трансформаторов с эпоксидной литой изоляцией.

Английская фирма «Бретфорд» выпускает трансформаторы с литой эпоксидной изоляцией на мощности от 100 до 1600 кВ·А на класс изоляции 11 и 22 кВ. Фирма может выполнять трансформаторы мощностью до 3000 кВ·А. Трансформаторы рассчитаны на рабочую температуру до 115° С при температуре окружающей среды 30° С.

Обмотка НН трансформаторов мощностью до 400 кВ·А имеет обычную катушечную конструкцию с несколькими параллельными медными проводами и с шинными наконечниками на концах. В трансформаторах мощностью 400 кВ·А и более обмотка выполняется из медной фольги с межслоевой изоляцией из пленочного материала.

Обмотки ВН наматывают из медного провода прямоугольного сечения с эмалевой изоляцией. Между слоями укладывается перфорированная изоляция, обеспечивающая хорошее проникновение компаунда к внутренним слоям обмотки.

Заливка обмоток НН и ВН компаундом производится раздельно. Трансформаторы, залитые эпоксидными компаундами, на мощности от 100 до 1600 кВ·А напряжением до 22 кВ·А выпускает чехословацкое предприятие БЕЦ в Братиславе.

Фирма «Смит Трансформаторен» в Голландии выпускает литые трансформаторы мощностью до 3000 кВ·А на класс изоляции 10, 20 и 30 кВ.

Аналогичные трансформаторы выпускаются американской фирмой «Вестингауз Электрик», французской фирмой «Колланж эн Фулюсд» и др.

## 10.2. ТРАНСФОРМАТОРЫ МОДУЛЯЦИОННЫЕ И НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Эпоксидная изоляция широко применяется в высоковольтных трансформаторах с амплитудой напряжения до 40 кВ, работающих в диапазоне частот до 25 кГц и при фиксированной частоте до 5...15 кГц. В таком диапазоне частот работают мощные трансформаторы модуляционных устройств передатчиков и выходных вещательных усилителей. По характеру нагрузки они могут различаться наличием у модуляционных трансформаторов телеграфного режима работы.

При фиксированной частоте эксплуатируются трансформаторы инверторов в закалочных, плавильных и других промышленных установках токов высокой частоты (ТВЧ). Появилась

необходимость создания маломощных и мощных высоковольтных трансформаторов для статических преобразователей постоянного тока, работающих при частоте  $3 \dots 10$  кГц с прямоугольной формой кривой напряжения (меандр), и для других радиотехнических устройств.

Для передачи поданного на входную обмотку сигнала с допустимыми искажениями на самой низкой частоте модуляционный трансформатор должен обладать индуктивностью холостого хода не менее заданного значения. Этот параметр зависит, главным образом, от выбранных и рассчитанных характеристик активных материалов трансформатора.

В области высоких частот на искажения оказывает большое влияние индуктивность рассеяния, измеренная со стороны первичной обмотки при замкнутой накоротко вторичной. Ее значение ограничивается десятками, а иногда и сотыми долями генри. Индуктивность рассеяния для стержневых модуляционных трансформаторов определяется следующим выражением:

$$L_s = 0,4\pi\omega_1^2 l_{cp} / (4h) [b_{12} + (b_1 + b_2) / 3] \cdot 10^{-8}, \quad (10.3)$$

из которого следует, что уменьшение индуктивности  $L_s$  может быть достигнуто увеличением высоты намотки  $h$ , снижением средней длины витков  $l_{cp}$  и расстояний в радиальном направлении между обмотками  $b_{12}$ , уменьшением толщины намотки первичной ( $b_1$ ) и вторичной ( $b_2$ ) обмоток.

Полагая, что в мощных модуляционных и в выходных трансформаторах вещательных усилителей оптимальные габариты определяются из соотношения активных материалов, и в том числе количества витков первичной обмотки  $\omega_1$ , рассмотрим, исходя из уравнения (10.3), возможность снижения индуктивности рассеяния.

Увеличение высоты обмотки  $h$  может привести к неоправданному росту габаритов трансформатора. Среднее значение индуктивности  $L_s$  зависит от площади сечения магнитопровода и значений величин, заключенных в скобках формулы (10.3). В работе [3] показано, что в зависимости от размещения обмоток значение индуктивности рассеяния можно изменить в несколько раз. Наиболее рациональным является разбивка каждой первичной и вторичной обмоток на четыре части и симметричное размещение их на обоих кернах в соответствии с рис. 10.8.

При таком размещении при намотке каждой четвертой части пирамидкой в один слой достигается наименьшая толщина  $b_1$  и  $b_2$  обмоток. Дальнейшее снижение индуктивности  $L_s$  можно получить уменьшением межобмоточной изоляции благодаря применению бумажно-эпоксидной или литой изоляции.

Недостатки вследствие разбивки обмоток на четыре части связаны с трудностью изоляции выводов начала и конца каждой четвертушки относительно друг друга и относительно маг-

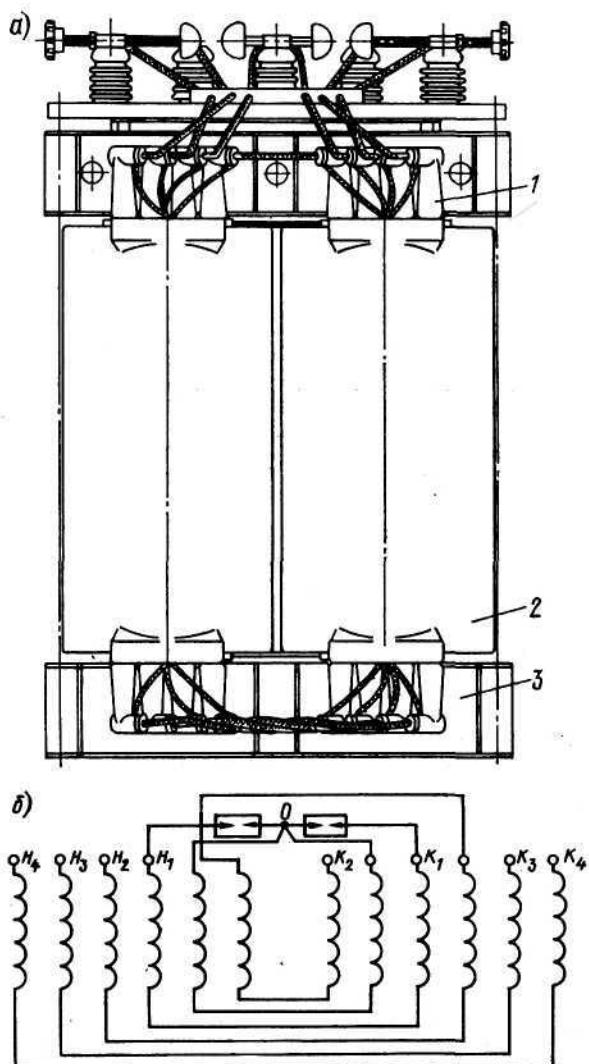


Рис. 10.8. Модуляционный трансформатор с высоковольтными выводами локального типа (а) и схема соединения обмоток (б)

1 — высоковольтный вывод; 2 — залитая компаундом катушка; 3 — магнитопровод; н — начало обмоток; к — конец обмоток

нитопровода. Наиболее надежным является вывод их на торцевую часть катушки и соединение посредством внешнего монтажа. Высоковольтные выводы четвертушек обмоток имеют локальную защиту. Предложенная конструкция выводов позволяет разместить их на ограниченном торцевом пространстве вблизи магнитопровода.

На трансформаторе установлен разрядник, который исключает появление между обмотками перенапряжения выше  $(1,2 \dots 1,5) U_{ном}$ .

К трансформаторам инверторов в установках ТВЧ предъявляются требования, аналогичные требованиям к модуляционным и выходным трансформаторам.

Однако условия работы, связанные с повторно-кратковременным режимом нагрузки, накладывают дополнительные требования к электродинамической стойкости конструкции и ее способности выдерживать перенапряжения.

Промышленное использование таких трансформаторов в больших количествах требует повышенного внимания к улучшению КПД.

В установках для поверхностной закалки трансформаторы нередко размещают на самой закалочной машине, которая при работе выделяет большое количество пара. Поэтому помимо уменьшения габаритов требуется обеспечить влагостойкость конструкции.

Все указанные особенности эксплуатации удачно учитываются применением литой эпоксидной изоляции, которая обеспечивает высокую электрическую и механическую прочность конструкции и ее герметичность.

Работа трансформаторов при фиксированных повышенных частотах требует более тщательного учета явлений вытеснения тока в поверхностные слои проводника и связанных с этим поверхностным эффектом, круговым и эффектом близости.

Мощные высоковольтные трансформаторы для статических преобразователей постоянного тока не отличаются по характеру своей работы и по конструкции от рассмотренных образцов.

Маломощные высоковольтные трансформаторы, например серии ТВЧ1, для усилителей мощности выпускаются на мощности 25 и 50 В·А на напряжения 1000, 1250, 1600, 2000 и 2500 В частотой 1000, 3000, 5000, 10 000, 15 000 и 20 000 Гц (рис. 10.9).

В них используются кольцевые магнитопроводы из пермалоя марки 79НМ толщиной 0,05 и 0,02 мм. Использование кольцевых (тороидальных) магнитопроводов обеспечивает минимальную индуктивность рассеяния.

В качестве межобмоточной изоляции применяют бумагу ЭИП-63В, фторопластовую пленку толщиной 0,04 мм. Чаще всего между обмотками укладывают гибкий стеклослюднит. Затем предварительно пропитанный трансформатор устанавливают в кожух из пресс-материала и заливают эпоксидным компаундом.

Малогабаритные высоковольтные трансформаторы низкой частоты типа ТВМ выполнены на П-образном ферритовом магнитопроводе 2000НМ. Высоковольтная обмотка напряжением до

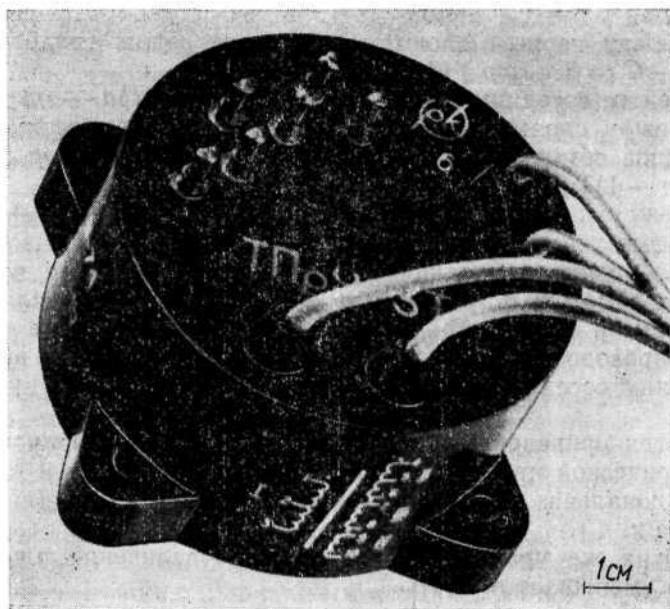


Рис. 10.9. Малогабаритный высоковольтный трансформатор питания статических преобразователей типа ТПр ( $U_p=2,5$  кВ;  $f=20$  кГц)

4 кВ разбита на четыре катушки, которые соединены последовательно и расположены на боковых стержнях. Намотка осуществлена медным микропроводом на каркасе. Половинки низковольтных обмоток располагаются на поперечнике. Напряжение обмотки 40 В, частота 16 кГц. Напряжение вторичной обмотки может быть 2000, 2500 и 3150 В, ток 10 А. Масса изделия 220 г, габариты  $55 \times 58 \times 34$  мм.

Трансформатор полностью заливается эпоксидным компаундом. Выводы высоковольтной обмотки сделаны кабелем марки ПВСТ или ПВТФ-5.

### 10.3. ИМПУЛЬСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Кроме влияний, обусловленных индуктивностями рассеяния и намагничивания, работа импульсного трансформатора характеризуется наличием собственных емкостных связей между элементами конструкции. Их можно разделить на емкостные связи между магнитопроводом и первичной обмоткой, между обмотками, между магнитопроводом и вторичной обмоткой, между витками первичной и вторичной обмоток, т. е. во всех промежутках, где обеспечивается изоляция между отдельными элементами трансформатора.



Значение емкостей определяется из следующих выражений [38]:

а) между первым слоем и магнитопроводом (рядовая намотка) —  $C = 8\epsilon\epsilon_0 r \omega p_m / (4a - \pi r)$ ;

б) между соседними витками —  $C_1 = 4r\epsilon\epsilon_0 / (4a - \pi r)$ ;

в) между слоями (емкости, приведенная к емкости выводных концов обмотки) (рядовая намотка) —  $C_2 = 4\epsilon\epsilon_0 r \omega p_{cp} / [4a - \pi r] (m - 1)$ ;

г) между обмотками  $C_3 = 4\epsilon\epsilon_0 r_{cp} \omega p_{cp} p_{cp0} / (4a - \pi p_{cp})$ , где  $\epsilon\epsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость изоляции;  $r$  и  $r_{cp}$  — радиус и средний радиус неизолированного провода смежных обмоток;  $p_1$ ,  $p_m$ ,  $p_{cp}$  и  $p_{cp0}$  — периметр витка или средний периметр витка;  $m$  — число слоев;  $a$  — расстояние между магнитопроводом и осью провода первого слоя, между витками или между соседними слоями;  $\omega_{cp}$  — среднее число витков в слое.

Во всех приведенных уравнениях емкость пропорциональна диэлектрической проницаемости материала изоляции и обратно пропорциональна расстоянию между электродами (витками, слоями и т. д.).

Из этих же уравнений следует, что увеличение плотности намотки уменьшает емкость.

Эпоксидные компаунды хотя и имеют довольно большую диэлектрическую проницаемость (4,5...5), широко применяются в импульсных трансформаторах благодаря своим высоким электрическим, механическим и герметизирующим свойствам. Особенно часто они используются для изготовления малогабаритных трансформаторов. Возможность исключить из конструкции трансформаторов все крепежные детали обмотки и арматуры крепления магнитопровода сделала эпоксидные компаунды незаменимым материалом во многих отечественных и зарубежных конструкциях.

#### 10.4. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ДРОССЕЛИ, КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И ВАРИОМЕТРЫ

Особенно широко эпоксидная изоляция применяется в высоковольтных сглаживающих и в зарядных дросселях, что объясняется устойчивой работой при пульсирующем и постоянном напряжениях.

Малая длительность фронта волны перенапряжения, достигающая в сглаживающих дросселях единиц или десятков микросекунд, может вызвать пробой межвитковой изоляции. Таким перенапряжениям особенно подвержена входная зона обмотки, поэтому эти витки особенно тщательно изолируются. Используется укладка дополнительной межвитковой изоляции, намотка витков с шагом, усиление изоляции внутри секции и между секциями. Указанные мероприятия осуществляют для 5% витков

начала и конца обмотки. В случае применения секционной намотки особое внимание уделяется изоляции вывода начала обмотки, который обычно проходит вдоль торца, первой секции.

Известно, что эпоксидная изоляция обладает при пульсирующем и постоянном напряжениях значительно большей электрической прочностью, чем при синусоидальном напряжении частотой 50 Гц, поэтому выбор толщины изоляции в сглаживающих дросселях производится с учетом этого фактора. Бумажно-эпоксидная изоляция может быть рекомендована до напряжений 10 кВ. Допускается применение бумажно-эпоксидной изоляции на рабочие напряжения несколько выше 10 кВ. Для внешней изоляции также не требуются до напряжения 10... 15 кВ специальных мер, устраняющих частичные разряды. В крупногабаритных изделиях изоляторные части применяют начиная с 15... 20 кВ. Сказанное, естественно, не касается работы в жестких условиях. Разработаны унифицированные дроссели типа ДВ на индуктивность от 0,01 до 80 Гн, ток подмагничивания от 0,06 до 15 А, энергоемкостью от 0,3 до 5 А<sup>2</sup>·Гн и от 5 до 50 кВ постоянного напряжения.

Ряд дросселей выполнен на ленточных разрезных магнитопроводах ПЛВ. Обмотка наматывается без применения каркаса и после съема с оправки обматывается по образующей стеклолентой, повышая механическую прочность обмотки и создавая буферный слой, снижающий термоупругие напряжения в изоляции.

Крепление обмотки в заливочной форме производится за выводы. Пропитка и заливка компаундом выполняется в вакууме. Выводы дросселей 5, 10 и 15 кВ не имеют изоляторной части. На шпильку выводов надевается гайка со сферической головкой.

Изоляторная часть дросселей на напряжении 20, 25, 30 и 50 кВ в верхней части имеет ребро которое, по мнению авторов разработки, должно увеличивать электрическую прочность внешней изоляции в условиях инея и росы.

Для крепления дросселей типа ДВ предусмотрены металлические буксы, залитые в наружный слой компаунда. Магнитопровод устанавливается на катушке и находится под нулевым потенциалом.

Габариты дросселей от 83×95×78 до 213×310×180 мм.

Применение дросселей с эпоксидной литой изоляцией, взамен применявшейся сухой без заливки, позволяет повысить надежность эксплуатации.

Для определения удельных показателей объема и массы дросселя введем понятие габаритного показателя  $k_{г.п.д.}$ , который выражается произведением энергоемкости дросселя на его рабочее напряжение:  $k_{г.п.д.} = I_0^2 L U$ , где  $I_0$  — ток подмагничивания;  $L$  — индуктивность. Соответственно, удельный показатель объема будет  $v_d = V/k_{г.п.д.}$ , а массы  $g_d = G/k_{г.п.д.}$

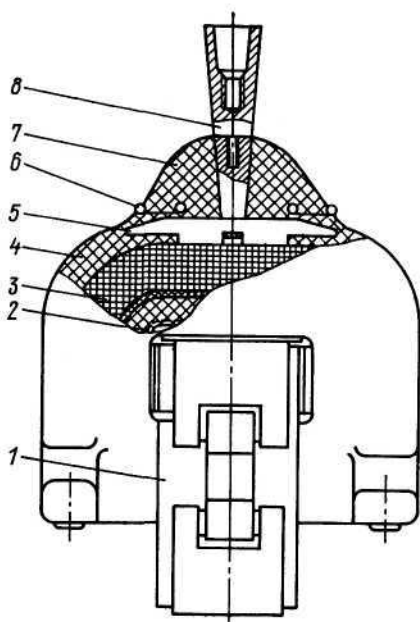


Рис. 10.10. Зарядный высоковольтный дроссель напряжением  $U_p = 20$  кВ

1 — магнитопровод; 2 — металлизация обмотки; 3 — обмотка; 4 — компаунд; 5 — панель; 6 — заземленный электростатический экран; 7 — изоляционная часть; 8 — вывод-экран

Установка в заливочной форме обмотки производится посредством панели, прочно закрепленной на самой обмотке.

В длинноволновой и средневолновой радиотехнике для дискретной настройки выходных контуров применяют воздушные катушки индуктивности, а для плавной — вариометры. В длин-

В табл. 10.3 приведены основные массогабаритные показатели дросселей, близких по своим параметрам, но различающихся по способу изоляции. Из этих данных видно, что конструкция с литой эпоксидной изоляцией позволяет улучшить удельные показатели объема для сглаживающего дросселя почти в шесть раз, а массу — более чем в три раза.

У зарядных дросселей один конец обмотки заземляется, что позволяет ограничиться одним высоковольтным выводом. На рис. 10.10 показан такой дроссель с изоляционной частью катеноидной формы. Низкий потенциал относительно земли первого слоя обмотки обусловил использование для намотки латунного каркаса, на который после небольшой изоляции уложены начальные витки. Дроссель залит за один технологический цикл.

Таблица 10.3

Характеристика	Значение характеристики для изоляции	
	сухой пропитанной	литой эпоксидной
Индуктивность, Гн	0,25	0,50
Ток подмагничивания, А	25,00	16,00
Напряжение, В	5,00	12,00
Габариты, м	$0,85 \times 0,48 \times 0,85$	$0,58 \times 0,28 \times 0,71$
Объем, м <sup>3</sup>	0,35	0,11
Масса, кг	650,00	350,00
Габаритный показатель	780,00	1536,00
Удельный показатель:		
объема, см <sup>3</sup> /(А <sup>2</sup> ·Гн·кВ)	$4,45 \cdot 10^{-4}$	$0,75 \cdot 10^{-4}$
массы, кг/(А <sup>2</sup> ·Гн·кВ)	0,84	0,23

новолновых устройствах намотка осуществляется высокочастотным проводом, состоящим из транспонированных изолированных проволочек диаметром от 0,07 до 0,13 мм в зависимости от частоты контура. Токпроводящая жила имеет пучковую скрутку с чередованием направления скрутки стренг и жил. Такая конструкция обмоточного провода снижает до минимума явление поверхностного эффекта и эффекта близости, которые имеют место в проводах на высоких частотах. Уменьшение потерь в проводе эквивалентно уменьшению его омического сопротивления. Повышается добротность катушек. В настоящее время кроме высокочастотного провода марки ЛЭЛОР с лавсановой оплеткой на напряжение до 500 В используется новый провод марки ПВВЭП с полиэтиленовой изоляцией до 3 кВ, а также провод на основе кремнийорганического каучука марки ПВЭПК на напряжение до 1...1,5 кВ. Электрические характеристики провода ПВВЭП приведены в табл. 10.4.

Таблица 10.4

Параметр	Значение параметра
Сопротивление постоянному току, Ом/м	$(0,58 \dots 0,62) \cdot 10^{-3}$
Сопротивление изоляции, МОм/км	$(1,2 \dots 1,33) \cdot 10^4$
Тангенс угла диэлектрических потерь при напряжении, кВ: 2,5...3,0 3,6	$(5,3 \dots 6,2) \cdot 10^{-4}$ $(3,0 \dots 5,5) \cdot 10^{-3}$
Пробивное напряжение 50 Гц, кВ: при ступенчатом подъеме при плавном подъеме	18...32 46...49
Напряжение возникновения частичного разряда при чувствительности схемы $10^{-10}$ пКл, кВ	6,8...6,9

Данные таблицы свидетельствуют о высоких электрических свойствах провода. В частности, напряжение возникновения частичного разряда почти в 2 раза превосходит требуемое для рабочего напряжения 3 кВ, которое должно иметь значение  $U_0 = 1,2U_p = 3,6$  кВ.

Провод марки ПВВЭП позволяет заменить в высоковольтных катушках требуемую по электрической прочности между витками намотку провода ЛЭЛОР с шагом 20...30 мм намоткой виток к витку и в несколько слоев.

Несущие детали и изоляционные элементы конструкции катушек индуктивностей и вариометров, намотанных проводом ЛЭЛОР, составляют более 50% массы всей катушки. Они изготавливаются из высокочастотного гетинакса, фторопласта и других дефицитных материалов различными технологическими способами в виде прессованных или клееных гребенок, прокла-

док и каркасов. Детали сложны в изготовлении и требуются в большом количестве для каждой конструктивной единицы.

1) Намотка провода ЛЭЛОР с шагом и применение диэлектрических крепежных деталей увеличивают габариты и массу катушек, среднюю длину витка и электрическое сопротивление катушки, в результате чего снижается добротность катушки:  $Q = \omega L/r$ .

В результате снижается КПД катушки, а следовательно, и всего радиотехнического устройства. Уменьшение добротности катушки при намотке с шагом может иногда оказать влияние на резонансные явления и КПД контура.

При намотке виток к витку индуктивность увеличивается в результате увеличения потокосцепления и уменьшения рассеяния электромагнитного поля.

Собственная емкость катушек определяется межвитковой емкостью и емкостью катушки относительно земли. Первая зависит от диэлектрической проницаемости зазора между площадью обкладок, которыми являются медные части соседних проводов с учетом температуры и влажности окружающего воздуха. Емкость относительно земли определяется диэлектрическими свойствами каркасов и площадью поверхности катушки, обращенной к «земле». Уменьшение размеров катушки при намотке виток к витку положительно сказывается на снижении собственной емкости вследствие сокращения площади обкладок из-за снижения средней длины витков.

Диэлектрические потери возникают в поле собственной емкости изоляции катушки.

В процессе эксплуатации при изменении окружающей температуры и влажности нарушается стабильность индуктивности катушки, намотанной проводом ЛЭЛОР. Влияние влажности вызывает увеличение межвитковой и собственной емкости за счет роста диэлектрических потерь в каркасе и крепежных деталей.

Новый принцип изготовления галет и собранной из них катушки характеризуется сваркой провода в процессе укладки виток к витку на специальном приспособлении.

Механическая прочность сваренных между собой витков провода ПВВЭП с площадью сечения 10 мм<sup>2</sup> и выше позволяет отказаться от каркаса, прижимных планок и других элементов конструкции.

Сохранение электрической прочности полиэтиленовой изоляции провода в процессе сварки, размеров и формы самой галеты, катушки или ротора и статора вариометра обеспечивается следующим:

применением непрерывного режима контактно-экструзионной сварки с оптимальной скоростью и температурой; сварка производится с помощью специального сварочного устройства; использованием специального прижимного ролика, размеры

которого, удельные усилия нажатия и скорость вращения оправки выбраны оптимальными с целью сохранения электрической прочности изоляции провода, исключения вредных деформаций в изоляции и сварного шва при сохранении максимальной прочности сварки;

разработкой режима термостатирования конструкции после сварки для снятия внутренних напряжений, возникающих при намотке, сварке и изготовлении самого провода.

Сваренные галеты стянуты между собой диэлектрическими трубами посредством диэлектрических фланцев, которые одновременно являются изоляторами катушки относительно земли. Галеты между собой изолированы диэлектрическими прокладками, на которых устанавливаются зажимы для внутреннего и внешнего монтажа.

Длина сварной катушки в 2 раза меньше аналогичных с такими же параметрами. Уменьшается расход активных изоляционных и конструкционных материалов на единицу индуктивности, повышается электрическая прочность и надежность эксплуатации катушек индуктивностей и вариометров.

Сварная конструкция лучше противостоит вибрационным и ударным механическим воздействиям. Изготовление ее менее трудоемко и поддается, в отличие от изготовления каркасных катушек из провода ЛЭЛОР, механизации и автоматизации.

## **ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ**

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

#### **11.1. ПОВОРОТНЫЕ И ОПОРНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ**

##### **11.1.1. Изоляторы промышленной и низкой частоты.**

Проектирование оптимизированных по массогабаритным характеристикам систем изоляции с заданным запасом электрической и механической прочности основывается на создании равнопрочных в электрическом и в механическом отношениях изоляционных конструкций (ИК). Такие конструкции не имеют чрезмерных локальных нагрузок и не требуют для обеспечения надежной эксплуатации увеличения изоляции.

Решение задачи равнопрочности обеспечивает:  
минимизацию массогабаритных характеристик;  
обеспечение оптимальной надежности;  
минимизацию стоимости изготовления.

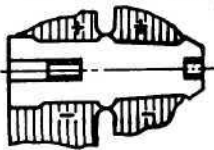
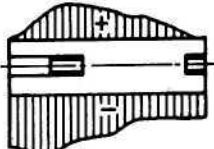
Помимо широко распространенных керамических реберных изоляторов применяются различные полимерные конструкции и в том числе гладкие, т. е. без ребер, утолщений и отдельных выступов.



Гладкие цилиндрические или эллипсоидальной формы опорные изоляторы имеют при соответствующей геометрии закладных элементов (электродов), по сравнению с реберными, более равномерное электрическое поле, требуют более простую и дешевую оснастку и характеризуются более надежной технологией изготовления.

В работе [35] показаны на примере эпоксидных опорных изоляторов кривые внутренних напряжений растяжения и сжатия для различных геометрий тела изолятора. В табл. 11.1 приведены такие напряжения для изоляторов с одинаковой внутренней арматурой.

Таблица 11.1

Тип изолятора	Кривые внутреннего напряжения
Конусный без выступов	
Конусный с двумя выступами	
Гладкий цилиндрический	
Реберный цилиндрический	

Примечания 1. Основные размеры изолятора: высота 70 мм; диаметр основания 26 мм, вершины 16 мм; диаметр арматуры 7 мм; резьба М5; высота нижней арматуры 24 мм, верхней 7 мм.

2. «+» — напряжение растяжения; «—» — напряжение сжатия.

Механические напряжения определены методами фотоупругости на прозрачных образцах без наполнителей. Для других материалов форма кривых внутреннего напряжения не меняется. Из кривых видно, что максимальные перепады механических напряжений имеют место в изоляторах с выступами и в реберном, а наиболее плавные изменения — в конусном и цилиндрическом. Более равномерные, различающиеся в пределах  $\pm 10\%$ , изменения напряжений в конусном изоляторе, по сравнению с цилиндрическим, объясняются увеличением диаметра нижней части тела цилиндрического изолятора, где создаются более благоприятные условия релаксации для большей по размерам нижней арматуры.

Сравнение таких напряжений при разной величине арматуры позволяет сделать следующие выводы:

- чем меньше высота нижней арматуры, тем хуже изолятор противостоит внешним нагрузкам;
- увеличение длины верхней арматуры отрицательно влияет на механическую прочность тела изолятора;
- диаметр нижней арматуры для конусных изоляторов может быть увеличен без заметного ущерба до 30 мм;
- в случае применения выступов целесообразно максимально увеличить их радиус кривизны.

Отрицательное влияние ребер на электрические характеристики анодных изоляторов описано в § 6.2.

Исследования также показали, что в реберных и с выступами изоляторах чаще возникает при поверхностном пробое «прижимание» дуги к поверхности. Эта особенность, которая не имела серьезного значения для керамических глазурированных изоляторов, приобретает для полимерных определяющий характер вследствие возникающих треков и дальнейшего ухудшения условий эксплуатации или выхода их из строя.

Результаты моделирования электрических полей и построение линий равной напряженности (рис. 11.1) показали, что оптимальная форма тела изолятора должна быть бочкообраз-

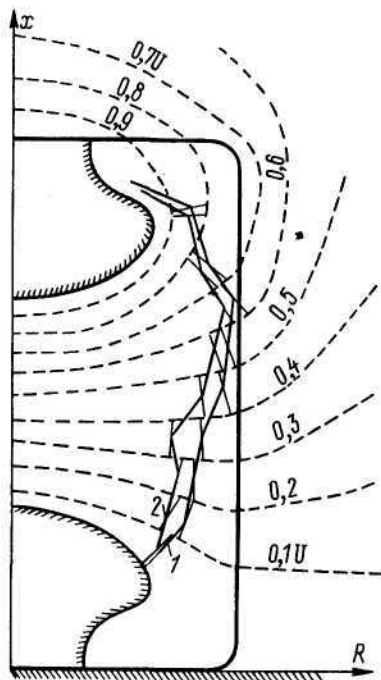


Рис. 11.1. Электрическое поле изолятора с линиями равной напряженности

1 —  $E_n = 1,0$  МВ/м; 2 —  $E_n = 0,9$  МВ/м

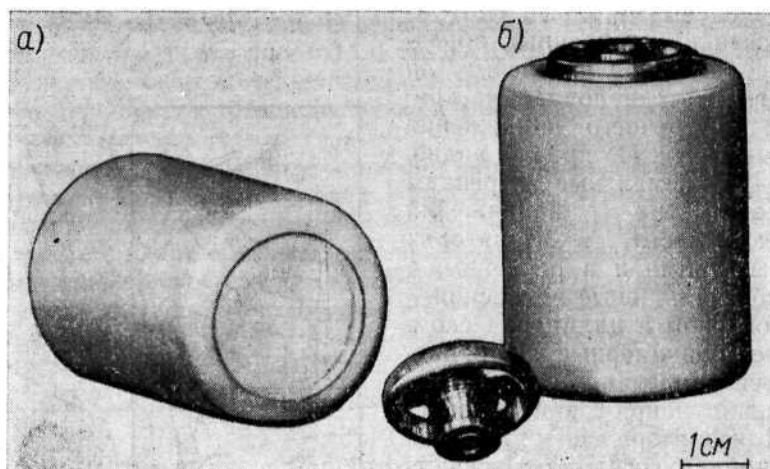


Рис. 11.2. Керамический изолятор до армирования (а) и после (б)

ной. Небольшая разница массы реберных и цилиндрических изоляторов, а также технологическая простота оснастки и изготовления при погрешности поверхностного пробоя 5...7% позволили для моделирования полей принять цилиндрический изолятор. Кроме того, при цилиндрической форме создаются условия для более равномерного осаждения пыли и влаги, более равномерного распределения поля.

Для опорных изоляторов, имеющих оптимальные электрические, механические, климатические и технологические характеристики, принимается цилиндрическая форма с диаметром, меньшим или равным высоте [36]. Такая форма позволяет по торцевой поверхности выбрать безопасную удельную нагрузку для любого материала.

Рассматриваемое соотношение диаметра и высоты успешно используется для напряжений до 10 кВ. При больших значениях напряжений минимизация массогабаритных характеристик не достигается из-за масштабного фактора напряжения поверхностного пробоя.

Массивные цилиндрические (стержневые) керамические изоляторы при мелкосерийном производстве изготавливаются из сырой парафинированной массы обработкой на токарном станке. Применяемая технология не требует специальной оснастки и приспособлений.

На торцах тела вытачиваются эллипсоидальной формы полости, обеспечивающие после нанесения металлического покрытия вжиганием выравнивание электрического поля (рис. 11.2).

Равномерное распределение внешней механической нагрузки

и минимальные термоупругие напряжения достигаются закреплением портландцементом или другим адгезивом в полости небольших металлических крепежных букс. При этом расходуется наименьшее количество металла. Надежность крепления букс в заливочном материале, помимо нанесения на их поверхности накатки, повышается приданием буксам формы перевернутого конуса. Обеспечивается также надежный электрический контакт между буксой и металлизацией.

Заливка букс эпоксидными компаундами вызвана выкрашиванием цемента при ударных и вибрационных нагрузках, а особенно после термоциклов — от минусовых до плюсовых значений.

Для установок промышленной и низкой (до 60 кГц) частоты изоляция опорных изоляторов может быть выполнена с использованием более простой технологии — заливки эпоксидными компаундами или прямого прессования полимерных материалов.

Прессование, как правило, является более производительным и надежным для обеспечения электрофизических и физико-механических свойств изоляции процессом по сравнению с заливкой.

Надежность достигается меньшим разбросом параметров пресс-материалов в состоянии поставки и строго регламентированной технологией.

Весь процесс прессования поддается более точному, чем заливка, контролю значений температуры, давлений и времени.

Альтернативным технологическим вариантом является серийное изготовление полимерных изоляторов из быстротвердеющих эпоксидных композиций методом автоматического гелеобразования давлением (АГД). Чаще всего применяются эпоксидные компаунды с ускорителями.

Метод АГД является в настоящее время наиболее производительным. Ведущие фирмы западной Европы и США («Вестингауз», АЕГ, «Циба» и др.), серийно выпускающие полимерные изоляторы, используют этот метод при изготовлении линейной и аппаратной изоляции. Некоторые фирмы освоили выпуск специальных автоматизированных линий для такой технологии.

Такие линии состоят обычно из автоматических дозаторов ингредиентов, вакуумного смесителя, дозатора готового компаунда, впрыскивающего под давлением 147,1... 196 кПа композицию в форму. Герметичная форма, состоящая из двух половин со своими нагревателями, совмещается посредством гидропривода. После смыкания формы и загрузки ее посредством дозирующего устройства в течение нескольких минут осуществляется желатинизация, и далее для окончательной полимеризации изделие загружается в термощкаф или в тоннельную печь с зонным нагревом.

При использовании метода АГД для небольших размеров изоляторов целесообразно, так же как и при заливочной технологии, применение кассетных форм, в которых одновременно изготавливается четыре и более изолятора.

Таблица 11.2

Характеристика	Значение характеристики изоляторов			
	эпоксидных		фарфоровых	
	тип ИОП10-400У2	фирмы „Куват“ (ФРГ)	ГОСТ 19797-85	унифициро- ванных МЭК
Габаритные размеры, мм:				
строительная высота	120	130	120	130
минимальный диаметр	43	—	—	—
максимальный диаметр	55	60	82	75
Длина пути утечки, мм	160	170	160	140
Масса, кг	0,5	0,6	1,4	1,5
Масса металлической арматуры, кг	0,1	0,06	0,12	0,58
Напряжение поверхностного пробоя, кВ:				
в сухом помещении	52	—	52	—
при выпадании росы	34	—	29	—
Разрушающее усилие при изгибе, МПа:				
минимальное	50,0	—	46,0	—
максимальное	70,0	—	49,0	—

В табл. 11.2 приведены сравнительные характеристики таких эпоксидных отечественных и зарубежных опорных изоляторов внутренней установки с внутренней заделкой крепежных букс и фарфоровых изоляторов [37]. Изоляторы типа ИОП10-400У2 массой до 400 кг изготавливаются из быстротвердеющего компаунда ЭКБ, имеющего временное сопротивление на растяжение 70 МПа, стойкость к циклическим воздействиям температуры от  $-40$  до  $+55^{\circ}\text{C}$  — три цикла,  $\text{tg } \delta = 0,005$ ;  $\epsilon = 4,3 \dots 4,8$ ;  $\rho_v = 3,1 \cdot 10^{13}$  Ом·см;  $E = 34$  кВ/мм и дугоустойчивость 194 мин.

Из табличных данных видно, что отечественные изоляторы марки ИОП10-400У2 не уступают зарубежным, прочнее фарфоровых и легче их в 3 раза.

Перспективным в технологическом отношении и по своим электрическим и механическим свойствам является пресс-материал марки СП-40, основным технологическим достоинством которого является быстрое отверждение. Время желатинизации при  $150^{\circ}\text{C}$  составляет 5...50 с. В зависимости от объема и сложности геометрии отверждение в форме может производиться в течение 1...10 мин. Такое время полимеризации зна-

Таблица 11.3

Тип изолятора	Тип арматуры	Материал	Рабочее напряжение, кВ	Диаметр (высота), мм	Масса, г	Поверхностный пробой		
						Напряжение, кВ		Средняя напряженность, МВ/м
						расчетное	экспериментальное	
Реберный	Внешняя	Керамика	17	60 (120)	850	—	51	0,42
Цилиндрический	Металлизированная полость с буксой	Керамика	20	45 (60)	265	60	60	1,00
Реберный	Букса	К251-14	17	60 (120)	440	—	54	0,47
	Металлизированная с буксой	ЭЗК-31, ЭТЗ-16	20	45 (60)	225	60	60	1,00
	Металлизированная прессованная с буксой	К-255-51, АГ-4С	20	45 (60)	160	60	56	0,93
Цилиндрический	Полупроводниковая с буксой	СП-40	20	45 (60)	180	60	70	1,16
	Металлическая сетка с буксой	ЭТЗ-16	40	70 (120)	960	100	100	0,83
Эллипсоидный фирмы „Микофер“	Металлическая букса	Слюдонаполненный пресс-материал	60	90 (180)	2200	150	140	0,71
			—	80 (80)	890	—	45	0,57



чительно меньше, чем время полимеризации других пресс-материалов.

Изготовление изоляторов, в том числе и крупногабаритных, производится методом прямого и литьевого прессования при температурах  $120 \dots 150^\circ \text{C}$  и давлении  $10 \dots 30$  МПа. Возможно изготовление литьем под давлением на реактопластавтоматах.

При всех перечисленных выше способах изготовления полимерные изоляторы по своим размерам, геометрии электродов и тела изолятора, конструкции и электрическим характеристикам мало отличаются друг от друга. Различается только способ крепления в форме закладных элементов в зависимости от давления при прессовании.

В табл. 6.4 приведены схематические изображения опорных изоляторов на напряжение  $U_p = 20$  кВ с различным исполнением арматуры, обеспечивающие на основе предложенных критериев оптимизации, методов моделирования и способов выравнивания электрических полей минимальные массогабаритные, максимальные электрические и механические характеристики. В табл. 11.3 приведены их сравнительные данные. Из таблицы следует:

1. Предложенные критерии оптимизации, конструктивно-технологические способы выравнивания электрических полей и термоупругих напряжений, а также примененные методы моделирования электрических полей обеспечивают оптимизацию массогабаритных характеристик керамических, полимерных и других типов опорных изоляторов.

2. Сравнение реберных фарфоровых и цилиндрических полимерных изоляторов с выравненным электрическим полем свидетельствует о возможности снижения габаритов и массы цилиндрических изоляторов.

3. Разработанные изоляторы при меньших габаритах и массе имеют также значительные преимущества по электрической прочности в сравнении с зарубежными образцами.

4. Снижение значений напряженности  $F_{\text{пер.ср}}$  для изоляторов на рабочее напряжение 40 и 60 кВ по сравнению с напряжением 20 кВ связано с влиянием масштабного фактора.

5. Изоляторы с полупроводящими электродами ( $\rho_v = 10^8$  Ом·см) имеют напряжение поверхностного пробоя выше, чем напряжение у остальных конструкций с сеточными или полимерными металлизированными электродами. Положительный эффект повышения напряженности поверхностного пробоя вызван, очевидно, падением напряжения в полупроводящих электродах.

Одним из примеров многофакторной оптимизации и одновременного решения электрических, механических, конструктивных и технологических задач является применение трубчатых изоляторов из различных диэлектрических материалов.

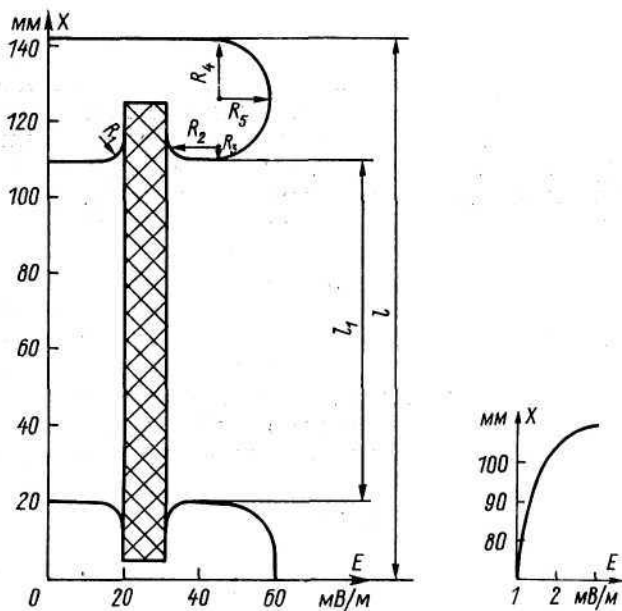


Рис. 11.3. Схематическое изображение опорного изолятора из стеклоэпоксидной трубки марки ТСЭФ и график распределения напряженностей электрического поля по поверхности

Применение полуфабрикатов из трубок вместо монолитных тел изоляторов позволяет минимизировать массу диэлектрического материала и трудоемкость изготовления, так как освобождает от изготовления дорогостоящей оснастки (литьевых или пресс-форм), сложных и энергоемких процессов изготовления.

Минимизация коэффициента неравномерности электрического поля и его нормальной составляющей (см. § 6.2) достигается использованием экранирующего эффекта узкой диэлектрической щели в электроде и наличием внутренней и внешней частей арматуры на одинаковом уровне. В этом случае картина электрического поля в районе заделки арматуры мало искажается, а эффект газового клина в зоне тройного сопряжения аннулируется выбором оптимального радиуса кривизны.

На рис. 11.3 приведено графическое изображение такого трубчатого изолятора на рабочее напряжение 20 кВ.

Для повышения влагостойкости тело изолятора покрывается лаком марки УР-221 или другим короностойким материалом.

Выбором оптимальной геометрии электродов достигнуто значение нормальной составляющей напряженности электрического поля по внутренней поверхности тела изолятора, значительно меньшее, чем по наружной. Возникают условия для по-

вышения электрической прочности внутри изолятора по сравнению с напряжением пробоя по внешней поверхности. Отсутствие внутри герметично закрытой части изолятора пыли и влаги также способствует повышению надежности эксплуатации. Снижение возможности выпадания внутри изолятора конденсата при понижении температуры обеспечивается заделкой и герметизацией верхней арматуры при температуре 100° С.

Помимо металлической арматуры, изготавливаемой любым способом (точением, прессованием, точным литьем), могут применяться также полупроводящие материалы с встроенной резьбой металлической буксой. Применение полупроводящих полимерных электродов, помимо упрощения процесса их изготовления и снижения массы по сравнению с металлическими образцами, обеспечивает снижение напряженности на поверхности электрода и повышает напряжение образования ПЧР. Мощность потерь в арматуре можно определить из выражения для удельной мощности плоского элемента

$$P = U^2 d / (\rho_v l), \quad (11.1)$$

где  $U$  — напряжение;  $d$  — толщина арматуры;  $l$  — расстояние между электродами;  $\rho_v$  — удельное сопротивление.

Таблица 11.4

Напряжение, кВ			Напряженность, МВ/м		Коэффициент неравномерности	Размеры трубчатых изоляторов, мм						
рабочее	поверхностного пробоя		максимальная расчетная	средняя		$l$	$l_1$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$
	расчетное	экспериментальное										
10	25	28	2,49	1,22	2,09	43	23	6	5	2	6	5
20	45	49	3,15	1,04	3,0	76	45,5	6	4	2,5	9	7
40	80	—	2,88	—	—	142	92	6	14	3	16	14
60	120	—	2,66	—	—	211	140	6	18	6	26	22

Приведенные в табл. 11.4 значения позволяют разработать оптимальные по электрическим свойствам и по габаритам трубчатые опорные изоляторы из различных диэлектрических материалов. Из таблицы также следует, что расчетные и экспериментальные значения напряжений поверхностного пробоя для изоляторов на рабочее напряжение 10 и 20 кВ различаются на 10% в сторону увеличения запаса электрической прочности.

Кривая зависимости  $E = f(Z)$ , где  $Z$  — высота изолятора, имеет маленький наклон, измеряемый разностью в 0,5 кВ/м, и небольшое увеличение напряженности на арматуре. Это, в частности, объясняется тем, что напряженность  $E_{\max}$  при рас-

четах по программе принимается на поверхности электрода (арматуры) и не учитывает влияние объемного заряда.

Применение стеклоэпоксидных и других трубок в качестве полуфабрикатов для изготовления тела изолятора показали следующее:

найлены простые в технологическом и эффективные в электрическом отношении способы минимизации коэффициентов неравномерности электрического поля, а следовательно, и минимизации габаритов и массы;

минимизированы нормальная составляющая электрического поля, особенно во внутренней, наиболее трудной по условиям контроля качества изготовления поверхности тела изолятора;

минимизированы термоупругие напряжения в теле изолятора благодаря тонкостенной конструкции и способу крепления металлической арматуры на трубе с помощью клея К-400, обладающего способностью к деформированию при перепадах температуры от  $-60$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ ;

минимизирована площадь поверхности тела изолятора благодаря ее цилиндрической форме; уменьшение оседания пыли на тело изолятора связано также с тем, что диаметр арматуры превосходит диаметр тела;

минимизирована трудоемкость.

Одной из положительных сторон трубчатого стеклоэпоксидного изолятора является возможность использования его на частоте до  $100 \dots 440$  кГц без возникновения термоупругого пробоя.

Напряжение поверхностного пробоя изолятора  $20$  кВ при  $f = 440$  кГц снижается на  $30 \dots 35$  кВ и с учетом запаса электрической прочности может применяться при  $15$  кВ рабочего напряжения.

Такое напряжение обеспечивает температуру перегрева при  $440$  кГц и работе в течение  $1$  ч, т. е. при установившемся тепловом режиме не выше  $20^{\circ}\text{C}$ .

Эпоксидные изоляторы и изоляторы из материала марки СП-40 на частоте  $25$  кГц подвергаются поверхностному пробую при  $U_n = 45$  кВ, а при  $U_p = 30$  кВ не перегревались выше  $30^{\circ}\text{C}$ .

Трубчатые опорные изоляторы, так же как и монолитные, имеют заметное снижение напряжения поверхностного пробоя при частоте  $25$  и  $110$  кГц, т. е. на более низких значениях первой критической частоты, чем имеет место пробой по воздуху. Очевидно, такое явление связано с теми же причинами, что и у монолитного изолятора.

#### 11.1.2. Высокочастотные изоляторы.

Эксплуатация изоляционных конструкций на частотах, измеряемых десятками мегагерц, по сравнению с эксплуатацией на частоте  $50$  Гц характеризуется следующим:

диэлектрическим нагревом изоляционного материала и воз-

возможностью термоупругого пробоя;

образованием объемного заряда и формированием условий пробоя вдоль поверхности;

специфическими явлениями факельного разряда;

возникновением и развитием ПЧР;

нагреванием в высокочастотном поле проводящих и полупроводящих материалов.

Для конструкций цилиндрической формы, которая обычно придается опорным изоляторам, при аксиальном высокочастотном электрическом поле нагрев по всему объему диэлектрика происходит неравномерно вследствие неодинакового значения напряженности электрического поля. Равномерность нагрева по всему объему цилиндра достигается только при ограниченных значениях отношения радиуса цилиндра к длине волны. При разнице напряженности на поверхности цилиндра и на его оси  $\pm 4\%$  величина  $2\pi r/\lambda$  должна изменяться от 0 до 0,4. Неравномерностью нагревания цилиндра в радиальном направлении объясняют, в частности, одну из причин термоупругих пробоев твердых диэлектриков, у которых модуль Юнга превосходит 120 МПа (см. § 5.3).

Для цилиндрических трубчатых опорных изоляторов с размерами, приведенными в табл. 11.4, температурное поле изолятора может быть представлено табл. 11.5, где  $P$  — диэлектрические потери в теле изолятора.

Таблица 11.5

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температура перегрева, °С, в зависимости от мощности потерь	
		в центре	на торцах
Темплен	0,3	$7P_1 + 0,4P_2$	$2,9P_1 + 28P_2$
Стеатит Б-17	2,5	$6,3P_1 + 5,6P_2$	$4,6P_1 + 16,6P_2$
Лейкосапфир	12,0	$5,7P_1 + 9,2P_2$	$5,3P_1 + 12,3P_2$

При использовании полупроводящих полимерных электродов потери в них определяются уравнением (11.1).

Из большой номенклатуры существующих материалов, у которых после изготовления изоляционной конструкции тангенс угла диэлектрических потерь остается не менее 0,002, целесообразно рассмотреть те, которые обладают высокой коронной и дугостойкостью или способностью к переработке в массивных конструкциях. К ним относятся стеатитовая керамика, например марки Б-17, лейкосапфир, металлокерамика 22ХС, которые имеют высокие электрические и механические свойства. Указанные материалы используются для изготовления трубчатых изоляторов в диапазоне частот, соответствующем мегагерцам.

Возможно также применение трубок из темплена, но они имеют низкую короностойкость и воспламеняемость при появлении электрической дуги, а также уступают другим высоко-

частотным полимерам по значениям механической прочности.

Из всех перечисленных материалов изготавливаются опорные изоляторы трубчатой конструкции с металлической приклеенной или припаянной арматурой, конструкция которых описана ранее.

Монолитные изоляторы с электрическим полем из блочного фторопласта-4 или миполон можно изготавливать точными. Металлическая арматура принимается такой же, как в трубчатых конструкциях. Для размещения внутренней части арматуры в теле изолятора выполняется заглабление, в котором плотной посадкой размещается внутренняя часть арматуры. Для крепления арматуры на теле изолятора нарезается резьба, поверхность которой обрабатывается для повышения адгезионной прочности. В качестве адгезива можно использовать клей К-400.

Из полиэтиленовых трубок целесообразно изготавливать изоляторы, у которых металлическая арматура с телом изолятора соединяется методом горячего формования (рис. 11.4).

Формование тела изолятора производится при нагретой до температуры текучести полиэтилена арматуре в специальной центрирующей оправке, обеспечивающей сохранение соосности и исключающей внецентренные нагрузки на изолятор. Область формования, где возможны отслоения и поры, находится вне электрического поля, что повышает электрическую прочность. Паз арматуры в сечении имеет максимальные допустимые радиусы кривизны, снижающие внутренние напряжения в материале после остывания. Образующийся при формовании грат свидетельствует о полном заполнении паза полиэтиленом и исключает возможность образования газового клина.

При необходимости эксплуатации при температурах порядка  $100^{\circ}\text{C}$  и механических нагрузках выше  $10 \dots 15$  МПа трубчатые изоляторы облучаются.

Такая же конструкция изолятора может быть изготовлена и из других формирующихся полимерных высокочастотных материалов (полипропилен и др.). Аналогичные типы изоляторов могут быть выполнены с арматурой из полупроводящих материалов. Для крепления изолятора в процессе прессования в арматуру устанавливается металлическая бокса с внутренней резьбой. Поверхность боксы выполняется с накаткой, а стенки ее делаются в форме перевернутого конуса, что повышает механическую прочность крепления.

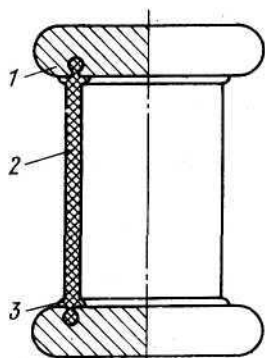


Рис. 11.4. Соединение полиэтиленового тела трубчатого изолятора с металлической арматурой методом горячего формования

1 — арматура; 2 — полиэтиленовая трубка; 3 — грат



Соединение полупроводящей арматуры с телом полиэтиленового изолятора может быть получено также сваркой.

Наличие полупроводящей арматуры повышает по сравнению с металлической напряжением появления короны и поверхностного пробоя.

### 11.1.3. Поворотные изоляторы.

Поворотные изоляторы служат для вращения ротора вариометров при настройке выходного контурного устройства высокочастотного генератора.

Основными требованиями к таким изоляторам, помимо оптимизации массогабаритных характеристик, являются электрическая и механическая прочность при минимальной высоте.

Точная передача угла поворота ротора требует обеспечения надежности заделки арматуры и механической прочности материала для тела изолятора.

В большинстве случаев ранее такие изоляторы изготавливались из соединенных клеем К-400 двух фторопластовых блоков. Поверхность склейки подвергалась для повышения адгезии специальной обработке.

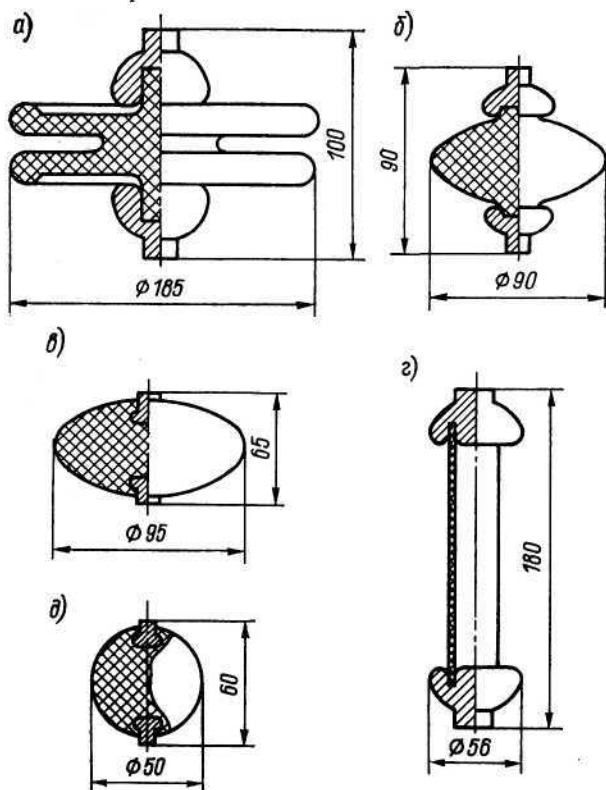


Рис. 11.5. Поворотные изоляторы старой (а) и новой (б—д) конструкций

На рис. 11.5 приведены образцы такого изолятора, в табл. 11.6 — сравнительные характеристики различных поворотных изоляторов на 20 кВ.

Таблица 11.6

Материал изолятора (рис. 11.5)	Габариты, мм		Масса, кг		Напряжение, кВ	
	Диаметр	Высота	Заготовка	Изолятор	поверхностного частичного разряда	поверхностного пробоя
Фторопласт:						
<i>a</i>	185	100	10,5	3,50	14	48
<i>б</i>	90	90	2,6	0,78	38	58
Керамика — <i>в</i>	95	65	—	0,65	35	51
Стеклоэпоксид (трубчатый) — <i>г</i>	56	180	—	0,50	40	60
Миполон — <i>д</i>	90	90/120	—	0,60	35	50

Из рис. 11.5, *a* видно, что форма изолятора для увеличения пути тока утечки сильно изрезана, хвостовик имеет большую площадь поверхности для уменьшения удельного усилия при передаче от оси привода. Внутренняя поверхность отверстия арматуры имеет косую насечку, посадка ее на хвостовик тела изолятора прессовая при нагретой арматуре до 150° С.

Фторопластовый (рис. 11.5, *б*), керамический (рис. 11.5, *в*) и миполоновый (рис. 11.5, *д*) изоляторы разработаны с применением универсальных критериев оптимизации. Картина электрического поля фторопластового изолятора близка к равномерной.

Известно, что фторопласт обладает хладотекучестью, слабой короностойкостью и быстрым загрязнением поверхности, которая удаляется только механическим путем. Этим недостатком лишены керамические изоляторы с внутренней заделкой арматуры клеем К-400. При всех положительных свойствах таких изоляторов отмечается технологическая сложность отжига и остывания, при которых появляются внутренние трещины и пробои.

Как видно из рис. 11.5 и табл. 11.6, керамические изоляторы в 1,5 раза ниже фторопластовых и легче последних.

Применение миполоновых изоляторов определяется технологическими преимуществами, вызванными возможностью прессования с одновременной заделкой металлической арматуры, что повышает также не только их механическую, но и электрическую прочность. Механическая надежность заделки арматуры обеспечивается ее формой, накаткой на поверхности и химической усадкой. Готовый изолятор облучают, тем самым повышая механические свойства тела изолятора. Одновременно благодаря дополнительной усадке при облучении повышается механическая прочность заделки арматуры.

Минимальную массу имеет трубчатый поворотный изолятор (рис. 11.5, *з*).

Приведенные в табл. 11.6 данные свидетельствуют о возможности дальнейшего снижения высоты поворотных изоляторов в 2 и более (для керамического) раза. Масса фторопластовых и миполоновых изоляторов новой конструкции снижена в 4...6 раз по сравнению с изолятором, приведенным на рис. 11.5, *а*.

Для миполоновых изоляторов высота при внутренней заделке арматуры увеличена на 30 мм вследствие увеличения длины хвостовика.

Приведенные примеры не исключают возможности других конструктивно-технологических решений на основе критериев оптимизации и равнопрочности конструкций.

## 11.2. ПРОХОДНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Выполнение критериев оптимизации для проходных изоляторов осложняется трудностями минимизации нормальной составляющей, и включением «газового клина» в области внешнего фланца и условиями обеспечения аэродинамических свойств при конусной форме тела изолятора.

Опыт разработки изоляционных конструкций показал возможность создания систем изоляции с равномерными электрическими полями, тело изоляторов в которых развито как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Несмотря на одинаковые значения коэффициента неравномерности и длины пути тока утечки, в зависимости от соотношения значений нормальной и касательной составляющих напряженности электрического поля реальные значения напряжения поверхности пробы в конструкции с максимальным углом наклона были на 25...35% больше, чем поверхности с малыми углами наклона.

В § 6.2 было показано, что конструкцию оптимальных проходных изоляторов целесообразно искать при создании катеноидного или эллипсоидального полей, для которых достигаются минимальные коэффициенты неравномерности электрического поля и значения нормальных составляющих напряженности электрического поля. Для упрощения технологии изготовления тоководов иногда их выполняют не катеноидными, а цилиндрическими, что ухудшает картину электрического поля и значение максимальной напряженности на 6...10% по сравнению с характеристиками внутреннего электрода катеноидной или эллипсоидальной формы.

В унифицированном ряду проходных изоляторов на напряжения 20 и 40 кВ для частоты 0,05...25 кГц из эпоксидного компаунда и для диапазона частот, соответствующего мегагерцам, из миполона таким образом и получено оптимальное тех-

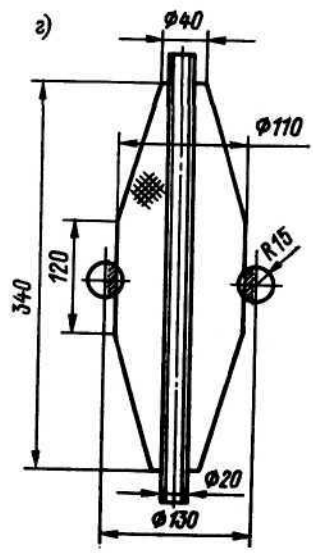
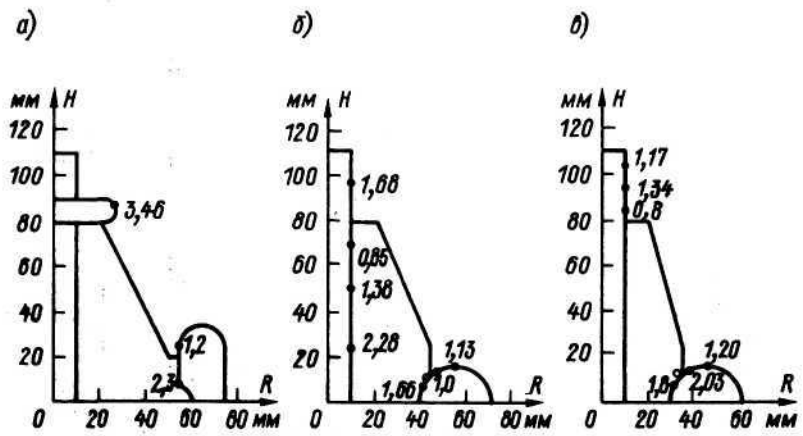


Рис. 11.6. Проходные эпоксидные или миполоновые изоляторы (см. табл. 11.7) и значения напряженностей при поверхностном пробое

нологическое решение (рис. 11.6). Из двух возможных вариантов формирования внешних электродов посредством заливки внутри металлической сетки и внешней металлизированной канавки был выбран последний, как не требующий специальных оправок для изготовления сеточного экрана сложной геометрии и завальцовки его в проволочные кольца.

Применение в качестве внешнего электрода заливкой внутри тела изолятора части фланца с заданной формой геометрии было исключено по условиям образования термоупругих напряжений и отслоений, а также из-за усложнения и увеличения размеров заливочной формы в которой требовалось разместить фланец. Диаметр формы увеличивается в этом случае на размер выступающей из тела изолятора внешней части фланца. Усложняются условия герметизации, сборки и разборки заливочной формы.

Для катеноидного поля наружная канавка необходимой формы легко осуществляется образованием в заливочной или прессовочной форме выступа заданной геометрии.

На рис. 11.6,а приведен проходной изолятор, у которого на краях имеются экраны и фланцы тороидальной формы. Фланцы закрепляются на металлизированной канавке тела изолятора. На рис. 11.6,б изображен изолятор с минимальным диаметром и фланцем в виде кольца.

Изолятор на рис. 11.6,в оказался при заданной высоте и длине пути тока утечки оптимальным по геометрии всех элементов и по напряжению поверхностного пробоя. На схематическом изображении всех изоляторов приведена напряженность электрического поля при напряжении поверхностного пробоя.

Таблица 11.7

Рис. 11.6	Размеры, мм			Напряжение, кВ		Максимальная напряженность, кВ/мм	
	Высота	Диаметр тела	Диаметр фланца	рабочее	поверхностного пробоя	на вводе	на фланце
<i>a</i>	160	90	150	20	48,1	3,4	2,88
<i>б</i>	160	50	100	20	37,2	1,34	2,03
<i>в</i>	160	90	140	20	46,5	1,68	1,9
<i>г</i>	340	110	160	40	85	1,7	2,0

Из табл. 11.7 видно, что изолятор рис. 11.6,б с минимальным диаметром тела изолятора и высотой, как у изоляторов на рис. 11.6,а и в, имеет напряжение поверхностного пробоя 37,2 кВ. Это на 20% меньше, чем напряжение пробоя аналогичного изолятора (рис. 11.6,в) с оптимальным диаметром. Изолятор рис. 11.6,а по сравнению с изолятором рис. 11.6,в имеет небольшое увеличение напряжения поверхностного пробоя при

значительно большей сложности изготовления арматуры.

Изолятор на 40 кВ (рис. 11.6, г) изготовлен с пропорционально увеличенными основными размерами изолятора на 20 кВ и допустимыми по условиям унификации размеров. Учитывая требования унификации диаметры сечения фланца-экрана, токовода и торца тела изолятора приняты аналогичными размерам изолятора на 20 кВ.

Высота увеличена в 2,06 раза с учетом уменьшения напряженности поверхностного пробоя вследствие влияния масштабного фактора.

При последующей металлизации канавки не создаются дополнительные термоупругие напряжения в процессе изготовления или эксплуатации из-за большой массы металла. Фланец, вставляемый при монтаже в металлизированную канавку, может иметь любую, определяемую конструктивными требованиями форму и толщину. При толщине фланца, меньшей, чем диаметр канавки, ее металлизация будет экранировать фланец и исключать образование «газового клина». Желательно по краям металлизации иметь залитое металлическое кольцо, которое при исполнении из высокочастотного обмоточного провода или антенного канатика, состоящих из отдельных проволок, имеет высокую адгезионную прочность при перепадах температуры. Возможны и другие варианты заделки края металлизации (см. § 6.2), в том числе и дополнительное использование по краям металлизации полупроводящих покрытий.

Аналогично может быть выполнен унифицированный ряд таких проходных изоляторов, изготовленных из эпоксидного компаунда марки ЭЗК-31. Внутренний токоввод выполняется из металлической трубки, которая для лучшей адгезии обматывается слоем стеклотенты.

Для использования в диапазоне частот, соответствующем мегагерцам, проходные изоляторы изготавливаются из блочного миполона или фторопласта-4. Металлизация канавки может быть также заменена приваркой полупроводящей пленки или ввариванием металлической сетки.

При серийном изготовлении целесообразно полиэтиленовое тело изолятора прессовать, а затем облучать.

Для питания прибора напряжением 12, 14, 18 и 22 кВ через заземленный электромагнитный металлический экран четыре проходных изолятора заменены одним с четырьмя тоководами, изолированными относительно друг друга. Применение такого изолятора позволяет улучшить условия электромагнитного экранирования, так как четыре отверстия для обычных изоляторов заменяются одним, что при жестком излучении прибора приобретает важное экологическое и биологическое значение.

Задача решена изготовлением эпоксидного проходного изолятора с четырьмя электродами в виде шпилек с резьбой, расположенных по вершинам мнимого квадрата (рис. 11.7). Для



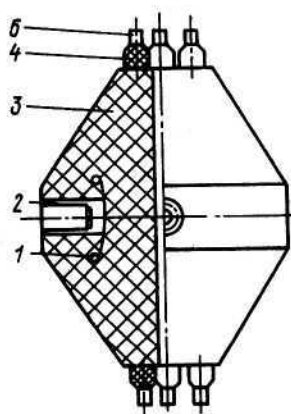


Рис. 11.7. Проходной многоштыревой изолятор

1 — экран; 2 — букса; 3 —  
эпоксидный компаунд; 4 —  
изолятор шпильки; 5 —  
шпилька

развязки по четырем цепям высокой частоты каждая шпилька на торцевой части изолятора снабжена приливом конической формы. Получена геометрия, при которой электрическая прочность по разделяющей шпильки поверхности выше воздушной и рассчитана на двукратный запас прочности. По электрическим характеристикам эта система изоляции оптимальна, так как помимо требуемой равномерности поля эквипотенциали подходят к границе раздела сред под углами, близкими к  $90^\circ$ , и нормальная составляющая вектора напряженности имеет минимальное значение.

Выравнивание электрического поля в изоляторе достигается оптимальным выбором формы тела изолятора и характеристик залитого в него электростатического экрана, выполненного из латунной сетки с завальцованными на проволочные кольца краями. К сетке припаяны четыре буксы, за которые экран крепится в заливочной форме. Эти же буксы служат для установки изолятора на электромагнитном экране прибора.

Моделирование электрического поля производилось для некоторого условного цилиндрического токоввода, размещенного вокруг четырех вводов.

Арматура (вводы) и залитый электростатический экран создают электрическое поле с  $k_n = 3$  и обеспечивают необходимое выравнивание поля.

Форма двойного конуса, а также конусные приливы у вводов создают благоприятные условия для разборки по оси изолятора формы, состоящей из двух половин. Токовводы в виде шпилек с резьбой одновременно служат для герметичного стягивания половинок формы. Литники для заливки могут устанавливаться с торцов или между буксами. Первый вариант является предпочтительным, так как в этом случае сетка электростатического экрана не препятствует движению струи компаунда, которая должна быть в процессе заливки непрерывной, чтобы не захватывать воздух.

Для снижения термоупругих напряжений шпильки и буксы обматываются хлопчатобумажной лентой.

Особенностью изолятора является многофункциональное использование шпилек и букс в процессе заливки и при эксплуатации.

Напряжение поверхностного пробоя такого изолятора при испытательном напряжении 36 кВ составляет 45 кВ постоян-

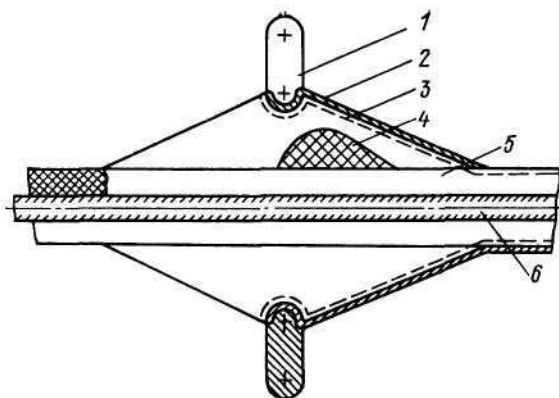


Рис. 11.8. Проходной изолятор из высокочастотного кабеля  
 1 — фланец; 2 — внешний экран кабеля; 3 — металлизация; 4 — полиэтиленовый прилив;  
 5 — изоляция кабеля; 6 — жила кабеля

ного напряжения. Размеры тела изолятора: диаметр 50 мм, высота (без шпилек) 60 мм.

Проходные изоляторы могут быть заменены высоковольтными кабельными вводами, длинный конец которых может быть использован также для передачи электроэнергии на некоторые расстояния. Вариант, разработанный на базе высокочастотного кабеля РК-50-44-17, представлен на рис. 11.8.

Ввод представляет собой отрезок кабеля с заземленным внешним экраном и специальной разделкой.

Оптимальная форма и размеры кабельной разделки выбраны методом моделирования электрических полей. Напряженность электрического поля на поверхности не превышает 1 МВ/м, что исключает образование ПЧР в процессе эксплуатации.

Полиэтиленовый прилив выполнен опрессовкой под давлением. Опрессованная часть имеет на своей вершине канавку катеноидной формы, металлизированную совместно с той частью кабеля, с которой была сдвинута металлическая оплетка внешнего экрана кабеля для операций по опрессовке. После металлизации внешний экран заводится в канавку и обжимается фланцем.

Установкой фланца в канавке достигается надежное крепление его на разделке кабеля и одновременно закрепление края оплетки и электрического контакта с металлизацией.

В данной конструкции, как и в других, достигается многофункциональное использование каждого элемента изоляционной конструкции. В данном случае форма канавки и последующая металлизация служат для выравнивания электрического поля, а также для надежного закрепления фланца и края оплетки кабеля. Металлизация может быть заменена вплавле-

нием металлической экранной оплетки в полиэтиленовую поверхность кабеля и ее разделкой в канавке.

Испытания кабельного ввода показали, что появление слышимой короны (ПЧР) происходит при напряжении 75 кВ, а поверхностный пробой — при 90 кВ, т. е. на 15 кВ выше значения испытательного напряжения.

Указанная конструкция разделки кабеля, по сравнению с известными в мировой практике, характеризуется простотой изготовления и надежностью эксплуатации.

### 11.3. РАЗЪЕДИНИТЕЛИ, РЕЛЕ, ВЫКЛЮЧАТЕЛИ И ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Разъединители механической блокировки (РМБ) предназначены для гарантированного отключения цепей питания и разряда на «землю» накопленной на элементах генератора емкости.

Основными требованиями к безопасности этих устройств являются надежность срабатывания всей системы защиты, исключающей соприкосновение человека с высоким напряжением, возможность визуального наблюдения за срабатыванием всех контактов и выявления аварии, когда после отключения контакт может оставаться замкнутым.

По системе изоляции такие разъединители делятся на два основных вида: стержневые — с большим количеством контактных ламелей на одном диэлектрическом стержне и изоляторы, у которых контактные устройства располагаются на изоляторах.

Для стержневых разъединителей могут использоваться керамические стержни или трубки, стержни из материала марки АГ-4С, полиэтиленовые и другие твердые диэлектрики.

На керамических стержнях контактные элементы закрепляются хомутами и клеевым способом.

При использовании материала АГ-4С и ПЭ или пропилена ламели, губки, гнезда и т. п. запрессовываются одновременно с изготовлением стержня.

Когда производство не является серийным и изготовление пресс-форм экономически не оправдано, возможно сваривание нагретых ламелей в полиэтилен или в полипропиленовые стержни или трубы.

Для выравнивания электрических полей форма контактных элементов выбирается с расчетными радиусами кривизны, обеспечивающими значения напряженности  $E_{\max}$  для минимальных расстояний по поверхности стержня и по воздуху между электродами. Особые меры принимаются против образования «газового клина» в зоне тройного сопряжения и отсутствия ПЧР при  $U_0 = 1,25U_p$ .

Стержневые конструкции разъединителей применяются при

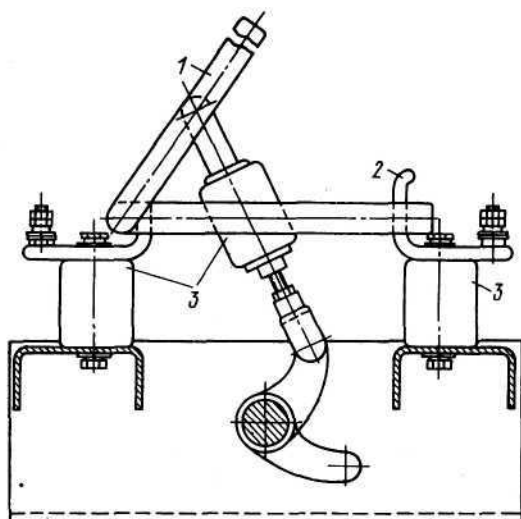


Рис. 11.9. Элемент разъединителя механической блокировки на опорных изоляторах

1 — замыкатель; 2 — губки; 3 — изоляторы

напряжениях до 10...12 кВ. При больших напряжениях обычно используются изоляторные конструкции.

На рис. 11.9 представлен элемент разъединителя механической блокировки разработанный на основе эпоксидных изоляторов на напряжение  $U_p = 20$  кВ. Высокие электрические и механические свойства эпоксидных изоляторов и большая точность крепежных размеров гарантируют надежность их эксплуатации.

Изоляционные расстояния по воздуху приняты из расчета некоронирующих промежутков при слабо неравномерном электрическом поле ( $k_n \leq 3$ ). Радиусы кривизны металлических элементов конструкции и воздушный зазор между ними рассчитаны графоаналитическим способом.

Уменьшению габаритов и снижению числа деталей в разъединителях способствует переход от стержневой системы изоляции к опорным малогабаритным изоляторам, разработанным на основе критериев оптимизации.

То же относится и к конструкции высоковольтных контакторов.

В табл. 11.8 приведены массогабаритные характеристики разъединителей и контакторов, выполненных на стержнях и на опорных изоляторах. Сравнение конструкций ввиду расхождения их технических и электрических характеристик производится по удельным показателям для одного контакта.

Из таблицы видно, что масса и объем на один контакт в 2 и более раза меньше для новых конструкций опорных изоля-

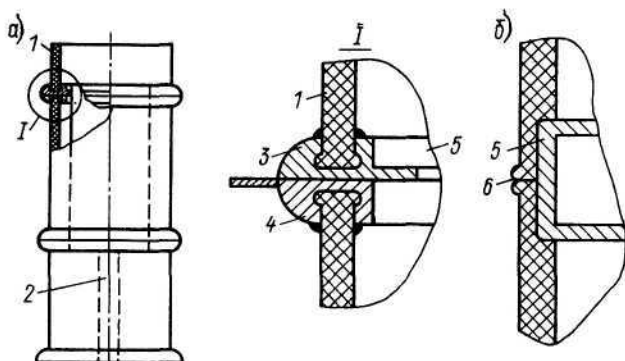


Рис. 11.10. Выключатели коаксиального типа и горячего формирования (а) и сварного типа (б)

1 — тело изолятора; 2 — шток; 3 — электростатический экран с выводом; 4 — соединение горячим формированием; 5 — контактное устройство; 6 — сварное соединение

торов. С учетом разницы в напряжениях, которые для рассмотренных изоляторных систем в 2...3 раза больше, эти показатели возрастают еще значительно.

Таблица 11.8

Тип устройства	Система изоляции	Число контактов, шт.	Напряжение, кВ	Габариты, м	Объем, м <sup>3</sup>	Масса, кг	Удельный показатель (на один контакт)	
							масса, кг	объем м <sup>3</sup>
Разъединитель	Стержневая	26	12	2,8 × 0,44 × 0,45	0,55	189	7,26	0,021
	Опорные изоляторы	19	20	2,01 × 0,45 × 0,23	0,207	70	3,68	0,011
Контактор	Стержневая	2	12	(0,53 × 0,43 × 0,23) · 2	0,103	50	4,16	0,008
	Опорные изоляторы	2	35	1,0 × 0,29 × 0,28	0,082	20	0,57	0,002

Система изоляции выключателей или переключателей коаксиального типа состоит из внешней трубы с встроенной по ее периметру контактной системой и из внутренней трубы с закрепленным на ней замыкателем в виде штока. Нижняя часть диэлектрической трубы со штоком соединяется с приводом штока, являющимся «землей» (рис. 11.10).

Система изоляции должна обеспечивать заданную электрическую прочность между верхней и нижней контактной систе-

мой с их выводами и выключенного штока относительно контактной системы, находящейся под высоким напряжением.

Преимущество коаксиальной системы изоляции по сравнению со стержневыми изоляторами заключается в минимальном числе деталей, пылезащищенности конструкции и ее более высокой электрической и механической прочности. Появляется возможность простыми конструктивно-технологическими приемами выравнять электрические поля и надежно закреплять контактную и штоковые части конструкции в теле их изоляторов, которыми являются диэлектрические трубы.

Сама конструкция контактного устройства допускает простую систему экранирования ламелей, находящихся в теле этого устройства, и создания внешних экранов для пробоя вдоль поверхности и по воздуху.

В качестве диэлектрических материалов может использоваться эпоксидный компаунд, керамические, стеклоэпоксидные и полиэтиленовые трубы.

Эпоксидные компаунды обладают высокой адгезией к металлической арматуре, особенно к алюминиевой (ТКЛР компаунда равен  $36 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ , ТКЛР алюминия —  $30 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ), большой механической прочностью и устойчивостью к ударным нагрузкам при включениях, маленькими допусками на все конструктивные размеры, легкостью придания компаунду необходимой формы.

К отрицательным свойствам компаундных изоляторов следует отнести возможность эксплуатации при частоте только до 50...100 кГц, относительную сложность оснастки, энергоемкость и продолжительность технологического процесса приготовления компаунда, заливки, вакуумирования, полимеризации и остывания.

Альтернативным серийному изготовлению эпоксидных выключателей может служить метод АГД.

Керамические трубы в качестве полуфабрикатов для коаксиальных выключателей лишены указанных выше недостатков. Однако большие допуски на овальность и толщину труб, их большая масса и сложность подгонки размеров полированием для соблюдения соосности контактного и штокового устройств делают применение их весьма трудоемким. Препятствием для применения керамики является также недостаточная ее ударная прочность, усложняющая условия транспортировки и монтажа.

Стеклоэпоксидные трубы, обладая теми же недостатками, что и керамические по геометрии и по допускам, имеют меньшую массу, превосходят их в технологии подгонки размеров, механической прочности и надежности приклейки к ним металлического контактного устройства или других деталей.

Такие трубы нуждаются также в дополнительном повышении влагостойкости и короностойкости, имеют ограниченное при-



менение на высокой частоте.

Полиэтиленовые коаксиальные выключатели имеют такие же недостатки конструкции, что и на стеклоэпоксидных трубах (размеры и коррозийность), а кроме того, имеют меньшую механическую прочность. Как показывают расчеты и опыт эксплуатации, механические нагрузки в выключателях не приводят к деформации и к заметному снижению механической прочности.

Преимуществом полиэтиленовых выключателей на трубчатых изоляторах является их технологичность, основанная на креплении арматуры сваркой или тепловым формованием, и возможность эксплуатации в любом, в том числе и соответствующем мегагерцам, диапазоне.

Сварная конструкция изготавливается на стандартном оборудовании, используемом для центрирования и сварки полимерных труб. Металлическая арматура в виде контактного устройства надежно фиксируется в выточенных пазах между двумя сваренными трубами.

Недостатком такой конструкции является наличие воздушных включений и отслоений между контактным устройством, находящимся под высоким напряжением, и полиэтиленом, т. е. в области максимальной напряженности электрического поля.

Меньшему старению полиэтилен подвергается при армировании на основе теплового формования. Как видно из рис. 11.10, формование осуществляется внутри экранной части арматуры, где сама геометрия металлической канавки экранирует отформованную часть полиэтилена. В зоне тройного сопряжения, опасной для возникновения напряженности  $E_{\max}$  и газового клина, при формовании образуется грат, который одновременно свидетельствует о заполнении канавки и исключает возникновение газового клина. Испытания выключателей, изготовленных методом теплового формования, показали, что для выключателя на рабочее напряжение 25 кВ при частоте 50 Гц и 25 кГц пробой происходит между участками конструкции по воздуху (между штоками и контактной системой, между контактными системами и другими участками) при напряжениях от 45 до 60 кВ, т. е. обеспечивается практически двойной запас электрической прочности.

Для выключателя 35 кВ пробой происходил также по воздуху при  $f = 25$  кГц и напряжении 65 кВ.

Оптимизация системы изоляции полиэтиленовых и стеклоэпоксидных коаксиальных выключателей и переключателей обусловлена следующим:

- 1) электрическое поле близко к равномерному, а его выравнивание обеспечивается самой контактной арматурой, геометрия которой получена решением краевых задач электростатики по программе АКСИАЛ;

2) механические напряжения в изоляции равномерно распределены по всей площади поперечного сечения трубы: сварка полиэтиленовых или склейка клеем К-400 стеклоэпоксидных конструкций вносят незначительные и несущественные изменения в характеристики изоляции;

3) нормальная составляющая напряженности электрического поля внутри меньше, чем на наружной поверхности, а форма электростатического экрана обеспечивает пробой при расчетных значениях не вдоль поверхности, а по воздуху;

4) поверхность тела изолятора не содержит выступов и загибов;

5) число деталей для системы изоляции минимально: используются серийно выпускаемые промышленностью диэлектрические трубы, а сборка осуществляется сваркой или склейкой, благодаря чему достигается минимальная трудоемкость.

Для системы изоляции и привода вакуумного выключателя на напряжение 25 кВ разработана установка дополнительной изоляции корпуса выключателя и штока выключателя относительно «земли» на напряжении 50 кВ. Механическое усилие на приводе примерно 10Н, а ход штока 2...3 мм.

На рис. 11.11 представлен общий вид установки вакуумного выключателя на напряжение 50 кВ.

Арматура внешнего цилиндра и его тело, выполненное из стеклоэпоксидной трубы, имеют в отличие от аналогичных изоляторов отверстие для прохода штока привода.

Арматура привода выполнена таким образом, чтобы не нарушать во время передвижения равномерность электрического поля. Пробой по воздуху между верхней и нижней арматурой происходит при напряжении около 100 кВ.

На рис. 11.12 приведен новый тип максимального реле на основе герконов. Достоинством таких реле является отсутствие движущихся механических деталей. Включение его осуществляется при броске тока, проходящего через обмотку, включенную в анодную цепь.

Конструктивно реле выполнено на основе металлической трубки, которая несет основную механическую нагрузку, слу-

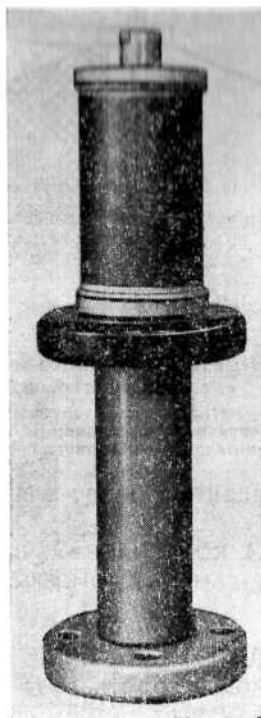


Рис. 11.11. Система изоляции привода вакуумного выключателя и установленный на нем вакуумный выключатель

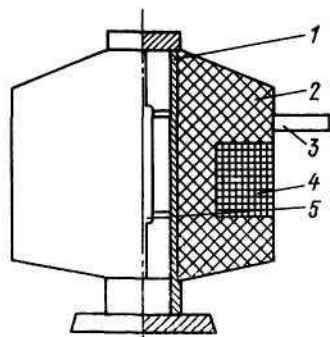


Рис. 11.12. Максимальное реле на основе геркона

1 — металлическая трубка; 2 — эпоксидная изоляция; 3 — вывод обмотки; 4 — обмотка; 5 — геркон

жит короткозамкнутым витком и корпусом для всего реле. Трубка залита в эпоксидный компаунд, имеющий металлизированную канавку с уложенной в ней обмоткой. Электрическое коаксиальное поле рассчитывается между заземленной трубкой и металлизированной канавкой. Коэффициент неравномерности электрического поля составляет 1,6. Постоянное рабочее напряжение 20 кВ, напряжение поверхностного пробоя 50 кВ.

Все рассмотренные конструкции имеют близкое к равномерному электрическое поле, характеризуются большой компактностью, имеют заданный запас электрической и механической прочности.

#### 11.4. КОАКСИАЛЬНЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ ТРАКТОВ

Размеры и форма элементов антенно-фидерных трактов (АФТ), выбранные по радиотехническим параметрам, должны удовлетворять заданной электрической прочности. Однако для элементов АФТ со сложной конфигурацией внутреннего и внешнего проводников (электродов) (рис. 11.13) отсутствуют аналитические решения задач электростатики.

Оптимальные размеры (наименьшие габариты при заданной надежности) и форма электродов выбираются в соответствии с допустимой напряженностью  $E_{\text{доп}}$  и допустимым значением коэффициента неравномерности  $k_{\text{доп}}$  электрического поля:

$$E_{\text{max}} \leq E_{\text{доп}} = E_0/k_3; \quad k_n = k_{\text{доп}} = E_{\text{доп}}/E_{\text{ср}} = E_0 l / (k_3 U_p), \quad (11.2)$$

где  $E_0$  — напряженность начала коронного разряда;  $U_p$  — приложенное (рабочее) напряжение;  $l$  — расстояние между электродами;  $E_{\text{ср}} = U_p/l$ ;  $k_3$  — коэффициент запаса, обеспечивающий надежную работу в течение заданного срока.

Определение коэффициента  $k_n$  по картине электрического поля, рассчитанного на ЭВМ, возможно в том случае, когда длины волны в фидере значительно больше геометрических размеров расчетной области, которые в радиальном направлении ограничиваются внутренним диаметром  $D$  внешнего проводника, а в осевом — выбираются такими, чтобы на границе отсутствовало изменение поля вдоль оси на расстоянии, не превышающем  $3D$ . Тогда для элементов АФТ с максимальным диаметром

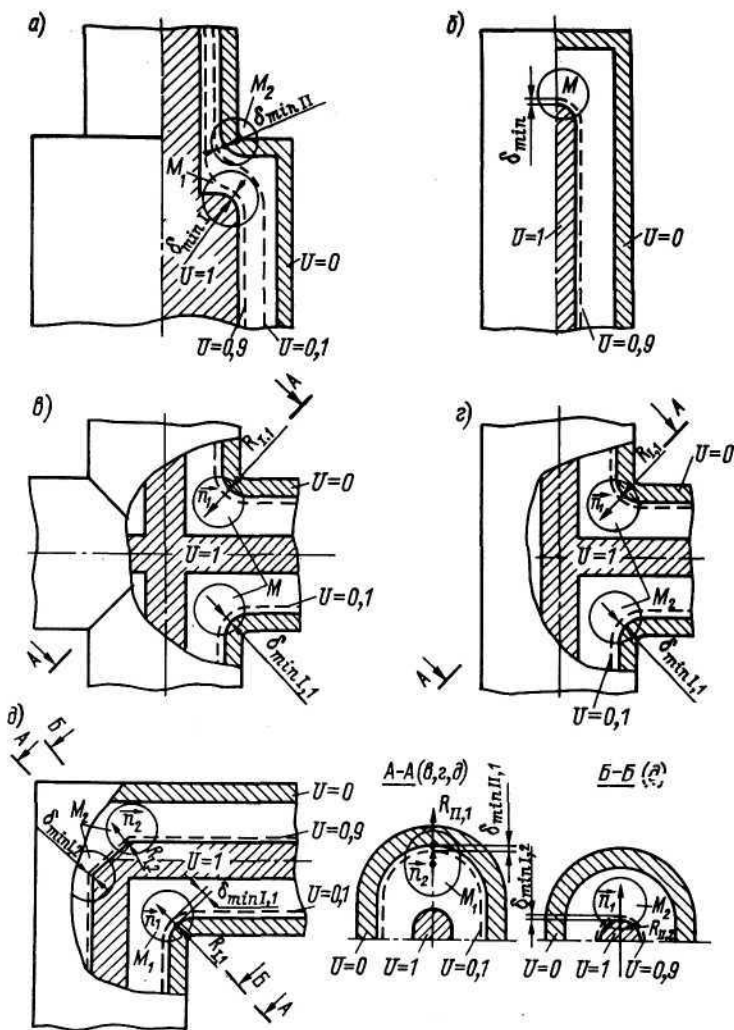


Рис. 11.13. Типовые элементы антенно-фидерных трактов с переменной кривизной поверхности: а — ступенчатый переход; б — концевая заделка фидера; в — коаксиальный крестообразный переход; г — коаксиальный Т-образный переход; д — коаксиальный Г-образный переход

300 мм законы электростатики применимы до частоты 100 МГц.

Расчет поля состоит в решении методом сеток уравнения Лапласа с кусочно-постоянными коэффициентами.

Для элементов АФТ с осевой симметрией (рис. 11.13)

$$E_{\max} = \Delta U / l_{\min},$$

где  $\Delta U = 0,1 U_p$  — изменение потенциала в области локальной неравномерности пространственного электрического поля, опре-

деляемое по его картине;  $l_{\min}$  — расстояние между электродом и ближайшей эквипотенциальной поверхностью. Тогда

$$\frac{\Delta U/l_{\min}}{U_p/l} = 0,1l/l_{\min}.$$

Для элементов АФТ, не обладающих осевой симметрией (рис. 11.13, в...д), производится расчет двух вспомогательных плоскопараллельных полей. Границы первого поля совпадают с сечением А—А, а второго — с сечением Б—Б. По картинам этих полей определяются расстояния  $l_{\min I}$  и  $l_{\min II}$  между электродами и соответствующими эквипотенциальными поверхностями. Коэффициенты неравномерности первого и второго плоскопараллельных полей  $k_{nI}$  и  $k_{nII}$  оцениваются по формуле (11.2).

В соответствии с законом кривизны [38]:

$$k_n = k_{nI}k_{nII}k_f = 0,01l^2k_f/(l_{\min I}l_{\min II}),$$

где  $k_f$  — коэффициент закона кривизны, вычисленный для ряда промежутков.

Часто удобнее производить расчет по методу Боуга [38]

$$k_n = k_{nI}k_{nII}/k_B = 0,01l^2/(l_{\min I}l_{\min II}k_B),$$

где  $k_B$  — коэффициент закона кривизны по Боугу, вычисленный для большего числа промежутков, чем  $k_f$ .

Для элемента АФТ определение коэффициента  $k_n$  производится на основании анализа средней кривизны  $H$  в области повышенной напряженности  $M_1$  или  $M_2$  (рис. 11.13):

$$H = 0,5(R_I^{-1} + R_{II}^{-1}),$$

где  $R_I$  и  $R_{II}$  — радиусы кривизны в сечениях А—А и Б—Б. Затем делается вывод о герметическом подобии поверхности электродов в рассматриваемой области одному из промежутков с известным значением  $k_B$ .

Так, для детали на рис. 11.13, д, в области  $M_2$  справедливы неравенства:  $R_I > 0$ ,  $R_{II} > 0$ . Величина  $H$  здесь изменяется от максимального значения к минимальному вдоль нормали  $n_2$  к поверхности внутреннего электрода, геометрически подобной поверхностям типа шарового конденсатора и эллипсоидов вращения с  $k_B \geq 1$ . Используется коэффициент  $k_B$  на конце большой оси софокусных вытянутых эллипсоидов вращения, которые характеризуются наименьшим значением этого коэффициента среди поверхностей указанных типов. Такое значение  $k_B$  может увеличить расчетный коэффициент неравномерности по сравнению с его истинным значением, что вызовет увеличение на 10...20% запаса электрической прочности элемента АФТ.

Для деталей на рис. 11.13, в...д в области  $M_1$  радиусы  $R_I < 0$ ,  $R_{II} = 0$ . Поверхности электродов в этих областях можно считать геометрически подобными поверхностям софокусных

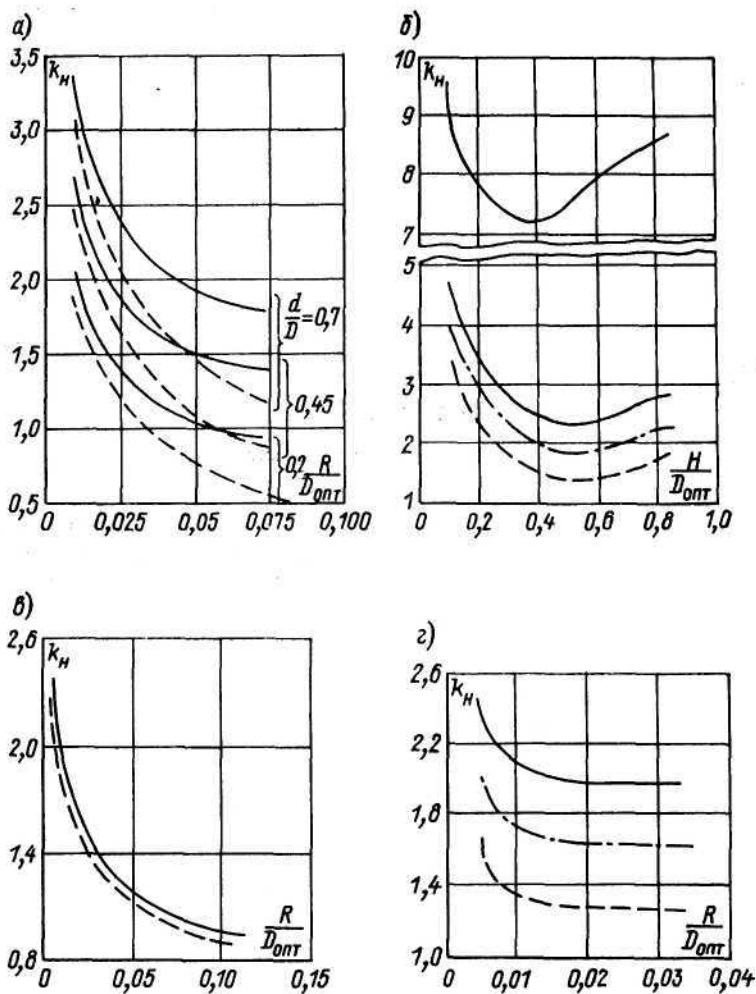


Рис. 11.14. Коэффициент неравномерности электрического поля в зависимости от отношения  $R/D$  (см. рис. 11.13) ступенчатого перехода в области  $M$  (а), концевой заделки фидера (б) и коаксиального крестообразного Т- и Г-образного переходов в области  $M_2$  (в)

$W = 75$  Ом — сплошные кривые;  $W = 60$  Ом — штрих-пунктирные кривые;  $W = 50$  Ом — штриховые кривые

гиперболоидов вращения. Известно [38], что в промежутках с  $\delta H > 6$  точное значение коэффициента  $k_f$  для совокупных гиперболоидов вращения меньше, чем для перекрещенных цилиндров, у которых наименьшее значение  $k_b$  равно 0,96. Для расчета принимаем  $k_b = 1$ . При этом запас электрической прочности увеличивается до 20%, а уменьшение расчетных значе-



ний коэффициента  $k_n$  составляет не более 4% по сравнению с истинным значением.

Из рис. 11.14, а, в и г видно, что коэффициент  $k_n$  монотонно убывает с увеличением радиуса  $R$  закругления острых кромок элементов и возрастает с увеличением волнового сопротивления  $W$ , а из рис. 11.14, б видно, что минимальное значение аналогично эффекту, возникающему в шаровом конденсаторе.

Расстояние между электродами вычисляется по формуле

$$l = R_0 - r_0 = r_0(R_0/r_0 - 1),$$

где  $R_0$  и  $r_0$  — радиусы наружного и внутреннего цилиндров.

При соединении фидеров различных диаметров (рис. 11.13, а) в качестве  $l_{\min}$  принимается расстояние между электродами наиболее нагруженного в электрическом и тепловом отношениях фидера меньшего диаметра:

$$\begin{aligned} l = l_{\min} &= (R_0 - r_0)_{\min} = (R_{0\min} - r_{0\min}) = \\ &= r_{0\min}(R_0/r_0 - 1). \end{aligned}$$

Здесь  $R_0/r_0$  определяется заданным волновым сопротивлением, а  $r_0$  — тепловым расчетом. При этом  $k_3$  выбирается по данным многолетней эксплуатации АФТ в заданном режиме, а  $E_0$  — экспериментально в зависимости от формы, размеров элемента, частоты рабочего напряжения и режима эксплуатации.

Так, для коаксиального крестообразного соединения (рис. 11.13, в) при  $D_{\max} = 300$  мм радиус  $R$  задается в пределах от 0,2 до 5 мм. При  $W = 60$  Ом и  $k_{\text{доп}} = 1,7R/D_{\text{опт}} = 0,0095$ . При  $D = D_{\max} = 300$  мм радиус  $R_{\text{опт}} = 2,9 \approx 3$  мм, или в 1,7 раза меньше заданного максимального значения.

Для элемента на рис. 11.14, б в качестве  $k_{\text{доп}}$  целесообразно принять минимальное значение  $k_n$ .

Величина  $H$  определяется неравенством  $H \geq R - r$ . При  $W = 150$  Ом отношение  $H/D_{\text{опт}} = 0,5(1 - r/R) \approx 0,4$ . По рис. 11.14, б величина  $H/D_{\text{опт}} = 0,4$ , т. е. лежит на нижней границе области заданного значения.

Предлагаемый графоаналитический метод позволяет выбирать размеры и форму электродов и изоляционных промежутков в зависимости от конструкторско-технологических ограничений, обеспечивать создание АФТ с минимальными расходами материалов и затрат труда.

Пользуясь графиками рис. 11.14, можно решать и обратную задачу: по заданным размерам и форме деталей определять коэффициент неравномерности и рассчитывать напряженность электрического поля элементов АФТ, т. е. на стадии проектирования определять запас электрической прочности, заложенный в конструкции.

Другим путем оптимизации элементов АФТ может служить принцип равной электрической прочности вдоль оси, т. е. условие примерного равенства значений напряженности возникно-

вения коронного разряда в коаксиально-цилиндрической части (области «регулярного поля»)  $E_{0ц}$  и в области локальной неравномерности  $E_{0л}$ , что обеспечивается равенством наибольших напряженностей в этих областях:  $E_{0\max ц} = E_{0\max л}$ .

Для области «регулярного поля» определяется коэффициент неравномерности электрического поля коаксиальных цилиндров:

$$k_{ц} = \frac{E_{0\max ц}}{E_{ср}} = \frac{R_0/r_0 - 1}{\ln(R_0/r_0)},$$

где  $E_{0\max ц} = U_p / \ln(R_0/r_0)$  — наибольшая напряженность в системе коаксиально-цилиндрических электродов;  $E_{ср} = U_p / l = U_p / (R_0 - r_0)$  — средняя напряженность в промежутке между электродами;  $U_p$  — рабочее напряжение;  $l = R_0 - r_0$  — расстояние между электродами;  $R_0$  и  $r_0$  — радиусы наружного и внутреннего цилиндров.

Там, где форма поверхности хотя бы одного из электродов отличается от цилиндрической, определяется коэффициент локальной неравномерности  $k_{н.л} = E_{\max л} / E_{ср}$ , где  $E_{\max л}$  — наибольшая напряженность в области локальной неравномерности.

Сравнение наибольших напряженностей в области «регулярного поля» и в области локальной неравномерности производится с помощью относительного коэффициента неравномерности

$$k_{н.о} = k_{н.л} / k_{н.ц} = E_{\max л} / E_{\max ц}.$$

Критерий выбора оптимальных размеров имеет вид  $k_{н.о} = 1$ , что обеспечивает выполнение условия и соблюдение принципа равнопрочности.

При оптимизации деталей АФТ по принципу равнопрочности исключается необходимость в определении зависимостей  $E_{0л}$  всех деталей от их размеров, а достаточно иметь зависимость  $E_{0ц}$  от  $r_0$  и  $R_0/r_0$  при заданных изменениях параметров эксплуатации. Это позволяет значительно сократить экспериментальную и расчетную части работы.

Процесс оптимизации производится с использованием зависимостей относительного коэффициента неравномерности  $k_{н.о}$  от размеров при выбранных значениях  $r$  и  $R_0/r_0$ . Соотношение  $R_0/r_0$  определяется заданной величиной волнового сопротивления  $W$ . В качестве  $r$  выбирается наибольшее значение из результатов теплового и электрического расчетов. В последнем случае отсутствие короны в процессе эксплуатации обеспечивается величиной, определяемой графическим решением уравнения

$$E_{доп} = U_p / [r_0 \ln(R_0/r_0)],$$

где  $E_{доп}$  — наибольшая напряженность в системе коаксиальных цилиндров, допустимая в процессе длительной эксплуатации

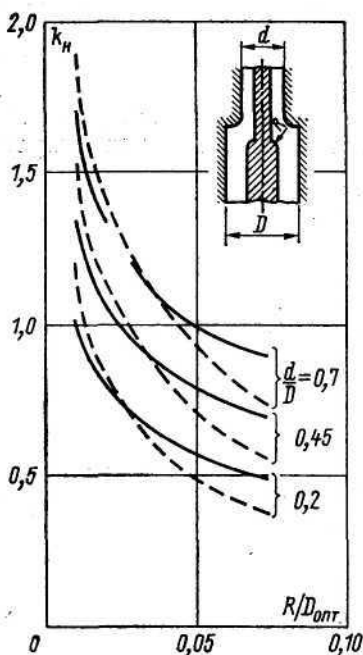


Рис. 11.15. Зависимость оптимального относительного радиуса закругления кромки ступенчатого перехода от отношения диаметров соединения фидеров и волнового сопротивления  $(W=75 \text{ Ом}$  — сплошные кривые;  $W=50 \text{ Ом}$  — штриховые кривые)

Для неосесимметричных полей (рис. 11.13, б... г) используется формула  $k_{н.о} = 0,1 l_{ц} / (l_{мин} l_{мин II} k_Б)$ . При соединении фидеров разного диаметра (рис. 11.13, а) фидер меньшего диаметра имеет большую напряженность у поверхности внутреннего проводника. Поэтому в расчете коэффициента  $k_0$  используется величина  $l_{ц} = l_{ц мин}$  — расстояние между внутренним цилиндром фидера меньшего диаметра и эквипотенциалью 0,9 в регулярной области.

На рис. 11.14, а представлены зависимости коэффициента  $k_n$  от размеров ступенчатого перехода в области I локальной неравномерности.

По этим графикам с помощью критерия оптимизации  $k_n = 1$  построены на рис. 11.15 зависимости оптимального относительного радиуса закругления кромки  $R/D_{опт}$  от соотношения диаметров соединяемых фидеров  $d/D$  и волнового сопротивления  $W$ .

при выбранном рабочем напряжении  $U_p$  и частоте;  $k_3$  — коэффициент запаса.

Зависимость напряженности  $E_{0ц}$  от геометрических размеров определяется экспериментально для системы коаксиально-цилиндрических электродов в выбранном режиме; величина  $k_3$  задается на основании данных длительной эксплуатации.

Зависимости коэффициентов  $k_{н.о}$  от размеров определяются с использованием картин электрических полей по методике, изложенной в начале данного параграфа, где в качестве электродов рассматриваются детали АФТ, влияющие на изменение картины электрического поля. Так, для осесимметричных полей (рис. 11.13, а) используется выражение  $k_{н.о} = l_{ц} / l_{мин}$ , где  $l_{ц}$  — расстояние между внутренним цилиндром и эквипотенциалью 0,9 в области «регулярного поля»;  $l_{мин}$  — наименьшее расстояние между электродом и соответствующей эквипотенциалью (0,9 или 0,1) в рассматриваемой области локальной неравномерности.

Аналогично можно получить зависимости оптимального относительного радиуса закругления кромки остальных вариантов рис. 11.14 от волнового сопротивления.

Размеры выбираемые с помощью приведенных зависимостей, являются оптимальными, так как обеспечивают при заданной электрической прочности в области локальной неравномерности наименьшую трудоемкость изготовления, а следовательно, и наибольшую технологичность.

Графоаналитический метод, основанный на условии равнопрочности, позволяет определять оптимальные размеры элементов АФТ, обеспечивающих надежную работу.

Для закрепления внутреннего электрода относительно внешнего применяются различные изоляционные конструкции.

Обычно применяемые изоляционные шайбы дисковой формы, помимо обеспечения электрических свойств, должны также обеспечивать требуемые радиотехнические параметры АФТ, в частности постоянство волнового сопротивления по всей длине фидера. Для компенсации скачкообразного изменения волнового сопротивления в месте установки и крепления шайб оба электрода должны иметь кольцевые углубления на всю толщину шайбы или снабжаться фланцами для ее укрепления. Неравномерность электрического поля в этой зоне снижает электрическую прочность изоляционного промежутка. Варьированием формы и размеров центрирующих шайб можно компенсировать это снижение.

В практике используются дисковые шайбы, имеющие в сечении трапецидальную форму, с сечением в виде ломаной трапеции, вогнутой и выгнутой чечевицы, конические и др.

В технологическом отношении помимо дисковой формы целесообразно применять трапецидальные шайбы, которые характеризуются также несколько большей электрической прочностью. Кроме увеличения пути тока утечки наклонное положение сторон создает благоприятное увеличение объема диэлектрика в радиальных сечениях от внешнего электрода к высоковольтному внутреннему. Поэтому вынужденное изменение диаметра на электродах в местах заделки шайбы происходит не скачком, а плавно, что уменьшает местную неоднородность поля в зоне армирования шайбы.

Описание зависимости коэффициента неравномерности электрического поля от варьируемых геометрических размеров может находиться методом планирования эксперимента при варьировании отношения радиусов внутреннего  $R_2$  и внешнего  $R_1$  электродов, а также угла наклона стороны трапеции.

Можно показать, что приведенный коэффициент неравномерности электрического поля  $k_{н.нр} = E_{\max} R_1 / U$  минимизируется при уменьшении отношения  $R_2 / R_1$  и при увеличении значения угла наклона  $\theta$ .

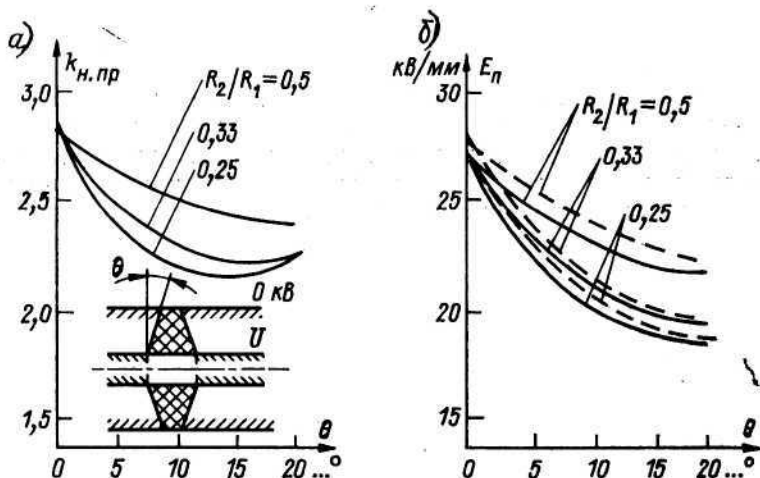


Рис. 11.16. Схематическое изображение трапецидальной шайбы между внутренним и внешним электродами и зависимости приведенного коэффициента неоднородности  $k_{н.пр}$  от угла наклона  $\theta$  для значений  $R_2/R_1$  — а и зависимости  $E_{п}$  от угла наклона для расчетных значений (штриховые кривые) и для экспериментальных (сплошные кривые) — б

Отношение  $R_2/R_1$  определяет волновое сопротивление фидера:

$R_2/R_1$	0,134	0,368	0,236	0,200	0,082
$W$ , Ом	50	60	75	110	150

Для волновых сопротивлений 75 и 150 Ом отношение  $R_2/R_1$  получается небольшим, что и требуется по модели. Угол  $\theta$  следует выбирать для данного отношения  $R_2/R_1$  с учетом конструктивных ограничений по размеру меньшего основания трапеции, прилегающего к внешнему электроду, в пределах  $20 \dots 30^\circ$  (табл. 11.9).

Таблица 11.9

Условие расчета	Значение приведенного коэффициента $k_{н.пр}$ при угле наклона $\theta, \dots^\circ$ , равном			
	20	25	30	35
$W=75$ Ом, $R_2/R_1=0,286$	23,0	22,6	22,1	21,6
$W=110$ Ом $R_2/R_1=0,20$	22,8	22,5	21,8	21,4
$W=150$ Ом, $R_2/R_1=0,082$	22,6	22,1	21,6	21,2

Результаты расчетов приведены на рис. 11.16.

Из приведенных расчетов вытекают следующие выводы:

1. Центрирующие шайбы коаксиальных фидеров трапецеидальной формы имеют относительно простую технологическую форму, повышающую электрическую прочность изоляционного промежутка за счет увеличения пути тока утечки и за счет плавного увеличения объема диэлектрика в пространстве между электродами.

2. Геометрические размеры шайбы выбираются по расчетной теоретической модели. Отношение  $R_2/R_1$  минимизируют в пределах  $0,3 \dots 0,2$ , а угол  $\theta$  наклона стороны трапеции максимизируют до значения примерно  $20 \dots 30^\circ$ .

3. Используя полученную модель для оценки приведенного коэффициента неравномерности, можно подобрать угол  $\theta$  (или отношение  $R_2/R_1$ ), обеспечивающий приемлемые значения коэффициента  $k_{н.пр} = 22,0 \dots 23,0$ .

Рассмотренный тип шайбы трапецеидальной формы, несмотря на более высокое напряжение поверхностного пробоя и обеспечение волновых характеристик АФУ, обладает определенными технологическими и экономическими недостатками по сравнению с плоской шайбой. Особые трудности возникают при массовом изготовлении трапецеидальных шайб больших размеров. Для трапецеидальной формы шайб значительно возрастает расход дефицитного фторопласта из-за увеличения толщины заготовки почти в 2 раза. Одновременно возрастают трудоемкость и отход дефицитного и дорогого материала в стружку.

Использование дисковых перфорированных фторопластовых шайб, в свою очередь, имеет следующие недостатки:

1) сложность сборки АФТ, связанной с необходимостью равномерной затяжки фланцев без воздушных включений между фторопластом и металлом; наличие воздушных включений приводит к образованию частичных разрядов (ЧР) и преждевременному разрушению фторопласта;

2) наличие дополнительного запасного количества шайб из-за низкой коронно- и дугостойкости фторопласта;

3) повышение мощности вентиляторов охлаждения из-за препятствий воздушному потоку, создаваемых шайбами;

4) низкие удельные нагрузки на шайбы из-за хладотекучести фторопласта;

5) образование в процессе эксплуатации несмываемых загрязнений на поверхности фторопластовых шайб, которые снижают поверхностную электрическую прочность; удаление загрязнения возможно только механическим путем.

Более рациональной представляется система изоляции с использованием опорных изоляторов из трубок на основе высокочастотных материалов. Конструкция таких изоляторов обладает для высокочастотных коаксиальных устройств существенными преимуществами по сравнению с шайбовой конструкцией



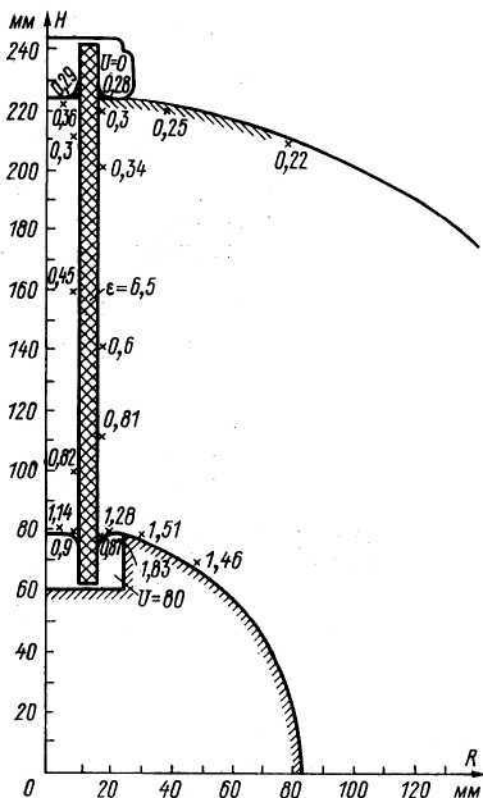


Рис. 11.17. Схематическое изображение опорного трубчатого изолятора между наружными и внутренними трубами коаксиального антенно-фидерного тракта (цифрами показана напряженность электрического поля при  $U_n = 80$  кВ)

или на основе опорных изоляторов из стержней:

использование 1..4 опорных изоляторов для крепления внутреннего токовода более чем в 50 раз сокращает расход изоляционных материалов;

трубчатые изоляторы по своим термоупругим свойствам позволяют эксплуатацию при более высоких частотах, чем стержневые из аналогичного материала;

разработанная форма электродов для трубчатых изоляторов (§ 6.1) позволяет достигнуть высокой степени равномерности электрического поля;

улучшаются условия принудительного охлаждения фидерного тракта вследствие отсутствия изоляционных шайб, препятствующих движению воздушного потока.

При рассмотрении трубчатого изолятора предусматривается выполнение следующих условий:

обеспечение равномерного электрического поля, что гарантирует минимальные массогабаритные характеристики и максимальную электрическую прочность;

отсутствие при напряжениях, меньших  $1,2U_p$ , частичных разрядов внутри и на поверхности тела изолятора, что исключает преждевременное разрушение диэлектрика и появление радиопомех;

надежность электрического контакта тела изолятора с металлическими элементами тракта;

механическая прочность изолятора.

С целью уменьшения расхода латуни выбрана арматура минимальной массы. Выравнивающий эффект электрического поля достигается совместным использованием арматуры изоля-

тора и поверхностей внутреннего и внешнего тоководов.

Окончательный вариант трубчатого стеатитового изолятора для АФТ и его установка представлены на рис. 11.17. Видно, что арматура сочленяются с внутренней поверхностью внешнего проводника АФТ таким образом, что трубы являются естественным продолжением арматуры изолятора.

#### 11.5. СИСТЕМЫ ИЗОЛЯЦИИ НЕСТАНДАРТНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСТРОЙСТВ

Нестандартным многофункциональным решением системы изоляции может служить устройство, предназначенное одновременно для охлаждения и электромагнитного экранирования высоковольтного высокочастотного прибора.

Для установки такого прибора предусматривались опорные изоляторы внутри заземленного металлического вентиляционного кожуха. Снаружи кожуха находился специальный электромагнитный экран.

Вентиляционный кожух для обеспечения электрической прочности размещался на расстоянии 30 мм от стенок высоковольтного прибора. Большой вентиляционный канал для движения воздушного потока с определенной скоростью требовал большой мощности вентилятора.

Разрешение противоречия между оптимальной шириной вентиляционного канала и безопасным изоляционным промежутком обеспечено созданием стеклоэпоксидного кожуха с металлизированными внутренней и внешней поверхностями.

Схематическое изображение приведено на рис. 11.18.

Внутренняя металлизация имеет высокий потенциал прибора. Оптимальный воздушный зазор между прибором и соединенной с ним металлизацией выбирается только по условиям охлаждения и имеет предельно малое значение.

Стеклоэпоксидный кожух является надежной изоляцией, а внешняя заземленная металлизация служит электромагнитным экраном.

Электрическая прочность между краями высоковольтной внутренней и заземленной внешней металлизацией определяется соответствующей формой заделки ее краев и выбором расстояния между ними.

Отсутствие стандартных конденсаторов на напряжение 40 кВ и большие габариты батарей конденсаторов на

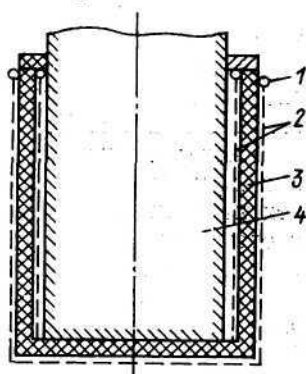


Рис. 11.18. Система изоляции, охлаждения и экранирования высоковольтного прибора

1 — заделка края металлизации; 2 — внутренняя и внешняя металлизация; 3 — стеклоэпоксидлит; 4 — прибор

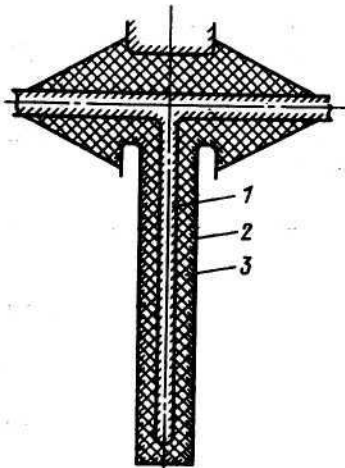


Рис. 11.19. Фильтр Т-образный

1 — внутренний токовод; 2 — металлизация; 3 — компаунд марки ПДИ-ЗАК

зации должны гарантировать надежный контакт с трубами — электродами фильтра.

Внешняя часть изоляции коаксиального фильтра создается посредством металлизации и последующего закрепления на ней токонесущих и конструктивных металлических конструкций (рис. 11.19).

Для предварительного выбора системы изоляции использовались кривые рис. 11.14, а для окончательного — моделирование электрического поля.

Длина отрезка, служащего фильтром составляет  $0,25\lambda/\sqrt{\epsilon}$ , где  $\lambda$  — длина волны, а  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость материала ПДИ-ЗАК.

Расчет электрической прочности произведен в предположении допустимого уровня частичных разрядов при  $k_n \leq 4$ , рабочей напряженности при длительном воздействии  $E_{cp} = 1,5$  МВ/м и отсутствии теплового пробоя. Расчетная напряженность электрического поля при поверхностном пробое принята 0,8 МВ/м.

Максимальная напряженность на внутреннем электроде определяется из соотношений:

$$E_{\max} = \frac{1}{\ln(R/r)} U_p / r;$$

$$E_{cp} = U_p / (R - r),$$

где  $R$  и  $r$  — радиусы внешнего и внутреннего электродов;  $U_p$  — рабочее напряжение.

При выбранном по конструктивным соображениям  $R = 40$  мм внутренний электрод имеет  $r = 13$  мм, максимальная

такое напряжение потребовали разработки специального Т-образного фильтра для передачи энергии между каскадами импульсного генератора.

Система изоляции такого коаксиального Т-образного фильтра основана на применении заливочного компаунда марки ПДИ-ЗАК, а геометрия электродов и изоляции разработана при условии создания равномерного электрического поля.

Достаточная эластичность компаунда обеспечивает возможность заливки металлической арматуры без образования термоупругих напряжений. Слабая адгезионная способность материала ПДИ-ЗАК учитывалась посредством размещения металла внутри компаунда, где усадочные явления при полимеризации должны гарантировать надежный контакт с трубами — электродами фильтра.

напряженность внутри изоляции  $E_{\max} = 2,73 \text{ МВ/м}$ , а коэффициент неравномерности  $k_n = 2,73/1,5 = 1,82$ .

Учитывая, что рабочее напряжение 40 кВ складывается из постоянной и переменной составляющей, а коэффициент неравномерности электрического поля близок к единице, максимальная рабочая напряженность принимается не превышающей 3 МВ/м.

Радиус экранного кольца на фланце фильтра определяется графоаналитическим методом [38] из уравнения  $k_n = f(r_0/l)$ , где  $l$  — толщина изоляции у электродов. При  $r_0/l = 0,207$  радиус  $r_0 = 6 \text{ мм}$ .

Длина пути тока утечки  $l_y$  выбирается при заданном запасе электрической прочности по поверхности 2,5.

Для  $E_n = 0,85 \text{ МВ/м}$  длина  $l_y = 120 \text{ мм}$ .

Полученный фильтр имеет минимальные для такой системы габариты и массу, характеризуется минимальными расходами цветных металлов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кухаркин Е. С., Сестрорецкий Б. В. Электрическая прочность волноводных устройств. — М.: Высшая школа, 1963.
2. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. — Ч. 1. — Л.: Энергия, 1972.
3. Павлов Н. Н. О размещении обмоток выходных трансформаторов мощных вещательных усилителей // Труды ЛЭИС им. Бонч-Бруевича. — Л., 1968. — Вып. 17.
4. Маслов В. В. Влагостойкость электрической изоляции. — М.: Энергия, 1972.
5. Электрические явления при облучении полимеров / А. П. Тютнев, А. В. Ваннико, Г. С. Минголаев и др. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Электрические свойства полимеров / Б. И. Сажин, А. М. Лобанов, О. С. Романовская и др. — Л.: Химия, 1986.
7. Балыгин И. Е. Электрические свойства твердых диэлектриков. — Л.: Энергия, 1974.
8. Вариводов В. Н. Исследование электроизоляционных характеристик опорной изоляции газонаполненных высоковольтных устройств на основе литых эпоксидных компаундов: Автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук. — М., 1979.
9. Бобровская Л. Д. Оценка допустимых напряженностей электрического поля в эпоксидной изоляции // Электричество. — 1981. — № 7.
10. Бобровская Л. Д., Кан К. Н., Васильков А. В. Влияние повышенной температуры на срок службы литой эпоксидной изоляции // Поляризация, электронный эффект, старение и пробой диэлектриков: [Материалы всесоюзной конференции. Физика диэлектриков и перспективы ее развития]. — Т. 2. — Л.: ЛПИ, 1973.
11. Ушаков В. Я., Гефле О. С. Основные закономерности электрического старения монолитной полимерной изоляции // Состояние и перспективы развития электрической изоляции: [Тезисы докладов к научно-техническому совещанию], 8—10 сент. 1987 г. — Свердловск, 1987.
12. Гуль В. Е. Реологические аспекты разрушения полимеров под действием механических и электрических сил // Механика полимеров. — 1983. — № 7.
13. Кокуркин М. П. Методы ускоренных испытаний полимерных изоляционных материалов на стойкость к действию поверхностных частичных разрядов // Повышение эффективности функционирования электрических систем и их элементов. [Тезисы докладов]. — Иваново, 1983.
14. Бургдорф В. В., Возинский В. Н. Исследование напряжения возникновения короны в высоковольтных конструкциях с полупроводящим покрытием // Электричество. — 1973. — № 5.
15. Бобровская Л. Д., Ларионова Н. С., Гинзбург Л. Д. Влияние свойств полимерной изоляции на разработку высоковольтной изоляции внутренней установки // Состояние и перспективы развития электрической изоляции. [Тезисы докладов]. — Л., 1987.
16. Арнольд П. А., Томсон Я. Е., Сударсан Т. С. Разряд вдоль поверхности диэлектриков между электродами, установленными под углом 45°: Об-

зор и новые результаты // *АвНИИ Транз. Инсьюленши.* — 1988. — Т. 23 — № 1.

17. Лимасов А. И., Покровский С. Ф., Яшин Ю. Н. Перекрытие твердых диэлектриков в резонансных полях на постоянном и переменном напряжениях. [Материалы к симпозиуму молодых ученых и специалистов. Энергетика]. — Новосибирск, 1968.

18. Жуков А. А., Бесхлебный С. И. Накопление положительных и отрицательных ионов в неоднородном электрическом поле на частоте 0,5—1 МГц // Возникновение и развитие газового разряда при высоких давлениях. — Тарту, 1984.

19. Бенинг П. Электрическая прочность изоляционных материалов и конструкций. — М.; Л.: Энергия, 1960.

20. Кан К. Н., Николаевич А. Ф., Славянинова Е. Л. Проектирование и технология герметизирующей изоляции элементов электротехнической и электронной аппаратуры. — Л.: Энергоиздат, 1983.

21. Сорк Э. О. Влияние условий формирования на свойства эпоксидного заливочного компаунда // Электротехническая промышленность. Электроизоляционные материалы. — Вып. 2 — 1973.

22. Хозин В. Г., Генералова Т. А., Воскресенская В. А. Зависимость физико-механических свойств эпоксидных полимеров от степени отверждения // Пластические массы. — 1971. — № 12.

23. Терентьев В. Ф., Козин И. А. Влияние температуры на длительную прочность жестких эпоксидных компаундов // Труды ЛИАП. — Вып. 84. — Л., 1974.

24. Можин В. Н., Кулаев Д. Х. Рассеяние энергии в эпоксидном компаунде при вибрационном нагружении // Труды ЛИАП. — Вып. 62. — Л., 1969.

25. Немец А., Серенсем С. В., Стреляев В. С. Прочность пластмасс. — М.: Машиностроение, 1970.

26. Изменение структуры и свойства отвержденных смол под влиянием наполнителя / Е. Б. Тростянская, А. М. Пойманов, Е. Ф. Носов и др. // Механика полимеров. — 1969. — № 6.

27. Мандзюк И. А. Исследование условий возникновения внутренних деформаций и напряжений в многокомпонентных эпоксидных композициях // 3-я конференция молодых ученых и специалистов по механике композиционных материалов. — Рига, 1981.

28. Куни Такеши. Остаточные напряжения в пластмассах и способы их измерения // Дзайру караку: Журнал оф Материалс Сайенс Сосайту. — 1982. — Т. 19. — № 3.

29. Термоупругие напряжения в эпоксидной изоляции высоковольтных трансформаторов / Ю. М. Валокабинский, Л. Д. Гинзбург, В. В. Пасынков и др. // Известия ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина). — Вып. 87. — Л., 1969.

30. Гинзбург Л. Д. Исследование и разработка высоковольтной изоляции на основе эпоксидных компаундов для трансформаторов радиоэлектронной аппаратуры: Автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук. — Л., 1970.

31. Колечицкий Е. С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. — М.: Энергоиздат, 1983.

32. Ротрелл Б., Битрих З., Тамхина И. Нанесение металлических покрытий на пластмассы — Л.: Химия, 1968.

33. Экерлунд С. Е. Использование способа проводящих бумаг для определения напряженности электрического поля вблизи поверхностей анода и катода // Журнал оф Электростатикс. — 1987. — № 2.

34. Трохта Зденек. Современное состояние и перспективы трансформаторов с обмоткой в литой изоляции // Технику Цраводи. — 1988. — № 26. — Прага.

35. Попэску К., Хуйду Т. Проблемы проектирования внутренних изоляторов из эпоксидных смол // Электротехника. — 1968. — Т. 16. — № 11.



36. Колечицкий Е. С. Методы расчета электрических полей высоковольтных аппаратов // Электричество. — 1980. — № 4.
37. Аполонов З. М. Высоковольтные изоляторы, изготовленные методом желирования под давлением // Электротехника. — 1988. — № 11.
38. Резвых Р. А. Расчет электрических полей в аппаратуре высокого напряжения. — М.: Энергия, 1967.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>ГЛАВА ПЕРВАЯ. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ . . . . .</b>	<b>6</b>
1.1. Влияние режимов работы изоляционных конструкций на внутреннюю изоляцию . . . . .	—
1.1.1. Эксплуатация трансформаторов и дросселей в схемах выпрямителей . . . . .	8
1.1.2. Эксплуатация трансформаторов тока и напряжения . . . . .	17
1.1.3. Эксплуатация трансформаторов и дросселей в усилителях низкой частоты . . . . .	19
1.1.4. Катушки индуктивности и вариометры . . . . .	20
1.1.5. Эксплуатация импульсных трансформаторов и зарядных дросселей . . . . .	21
1.1.6. Разъединители механической блокировки, контакторные устройства, выключатели, переключатели . . . . .	—
1.1.7. Антенно-фидерные тракты . . . . .	22
1.2. Влияние режимов работы изоляционных конструкций на внешнюю изоляцию . . . . .	23
1.3. Влияние климатических и механических условий эксплуатации . . . . .	24
1.3.1. Температура . . . . .	27
1.3.2. Повышенная влажность . . . . .	28
1.3.3. Радиационная стойкость . . . . .	31
1.3.4. Механические факторы . . . . .	32
<b>ГЛАВА ВТОРАЯ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ . . . . .</b>	<b>32</b>
2.1. Электрическая проводимость, поляризация и диэлектрические потери . . . . .	33
2.2. Кратковременная и длительная электрическая прочность . . . . .	40
2.2.1. Эпоксидные компаунды . . . . .	—
2.2.2. Полиолефины и другие полимерные материалы . . . . .	49
2.2.3. Керамика, лейкосапфиры . . . . .	51
2.2.4. Электрическая прочность при механическом нагружении . . . . .	55
2.3. Короностойкость и дугостойкость полимерных материалов . . . . .	57
2.4. Полупроводящие полимерные материалы . . . . .	61
<b>ГЛАВА ТРЕТЬЯ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ И ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ . . . . .</b>	<b>65</b>
3.1. Пробой в воздухе и вдоль поверхности на постоянном напряжении и при частоте 50...400 Гц . . . . .	—
3.2. Пробой в воздухе и вдоль поверхности при высокой частоте . . . . .	74
<b>ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ . . . . .</b>	<b>84</b>
4.1. Факторы, влияющие на механические свойства изоляции . . . . .	—

4.1.1. Эпоксидные компаунды . . . . .	85
4.1.2. Термопласты . . . . .	90
4.1.3. Стеатитовая керамика . . . . .	94
4.1.4. Стеклопластики . . . . .	95
4.2 Кратковременная и длительная прочность . . . . .	—
4.2.1. Эпоксидные компаунды . . . . .	96
4.2.2. Термопласты . . . . .	102
4.2.3. Стеклопластики . . . . .	105
4.3. Адгезионная прочность . . . . .	106
<b>ГЛАВА ПЯТАЯ. ТЕРМОУПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТЕРМОУПРУГИЙ</b> <b>ПРОБОЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ . . . . .</b>	<b>113</b>
5.1. Образование термоупругих напряжений в изоляции . . . . .	—
5.2. Снижение термоупругих напряжений . . . . .	124
5.3. Образование термоупругих пробоев в изоляции . . . . .	129
<b>ГЛАВА ШЕСТАЯ. КОНСТРУКЦИЯ С ВЫРАВНЕННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ</b> <b>ПОЛЕМ . . . . .</b>	<b>134</b>
6.1. Выравнивание полей внутренней изоляции . . . . .	—
6.2. Выравнивание полей внешней изоляции . . . . .	149
<b>ГЛАВА СЕДЬМАЯ. ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИ-</b> <b>ЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ . . . . .</b>	<b>157</b>
7.1. Электро моделирование . . . . .	—
7.2. Решение краевых задач электростатики на ЭВМ . . . . .	163
<b>ГЛАВА ВОСЬМАЯ. ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКО-</b> <b>ВОЛЬТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ . . . . .</b>	<b>169</b>
8.1. Критерии оптимизации . . . . .	—
8.2. Выбор изоляционных промежутков . . . . .	172
8.3. Оптимизация технологии . . . . .	181
<b>ГЛАВА ДЕВЯТАЯ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ</b> <b>ТРАНСФОРМАТОРОВ . . . . .</b>	<b>184</b>
9.1. Конструкции высокопотенциальных трансформаторов . . . . .	—
9.2. Блочные трансформаторы . . . . .	189
9.3. Трансформаторы с малой емкостью . . . . .	198
<b>ГЛАВА ДЕСЯТАЯ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОР-</b> <b>МАТОРОВ И ДРОССЕЛЕЙ . . . . .</b>	<b>205</b>
10.1. Высоковольтные силовые и анодные трансформаторы . . . . .	—
10.2. Трансформаторы модуляционные и низкой частоты . . . . .	219
10.3. Импульсные трансформаторы . . . . .	223
10.4. Высоковольтные дроссели, катушки индуктивности и варно- метры . . . . .	224
<b>ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКО-</b> <b>ВОЛЬТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ . . . . .</b>	<b>229</b>
11.1. Поворотные и опорные изоляторы . . . . .	—
11.1.1. Изоляторы промышленной и низкой частоты . . . . .	—
11.1.2. Высокочастотные изоляторы . . . . .	239
11.1.3. Поворотные изоляторы . . . . .	242
11.2. Проходные изоляторы . . . . .	244
11.3. Разъединители, реле, выключатели и переключатели . . . . .	250
11.4. Коаксиальные высоковольтные конструкции антенно-фидер- ных трактов . . . . .	256
11.5. Системы изоляции нестандартных высоковольтных устройств . . . . .	267
Список литературы . . . . .	270
18 Зак. 445	273

Производственное издание

ГИНЗБУРГ ЛЕВ ДАВЫДОВИЧ

**ТВЕРДАЯ ИЗОЛЯЦИЯ  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ВНУТРЕННИХ УСТАНОВОК**

Редактор *В. Н. Миханкова*  
Художник обложки *В. Т. Левченко*  
Художественный редактор *В. М. Мартынов*  
Технический редактор *Ю. А. Богданова*  
Корректор *М. С. Мордашева*

ИБ № 2828

Сдано в набор 28.05.91. Подписано в печать 24.02.92. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага типографская № 2. Печать высокая. Усл. печ. л. 17,25. Усл. кр.-отг. 17,5.  
Уч.-изд. л. 19,38. Тираж 300 экз. Заказ 445.

Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение. 191065 Санкт-Петербург, Д-65,  
Марсово поле, 1.

Типография ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева,  
195220 Санкт-Петербург, К-220, Гжатская ул., 21.



**Уважаемые читатели!**

Предлагаем вашему вниманию следующие книги

**Вайнштейн Л. И.** Памятка населению по электробезопасности. — 3-е изд., перераб. и доп. 1987. — 64 с., ил. — (в обл.) Цена 35 к.

Даны сведения об опасности действия электрического тока и его последствиях, а также необходимые рекомендации безопасного пользования электрическими приборами и аппаратами (машинами) в домашних условиях и вне помещений. Приведены правила поведения при обнаружении неполадок на ВЛ. Описаны правила оказания первой доврачебной помощи пострадавшему от электрического тока.

Для широкого круга читателей, а также инженерно-технических работников, занятых проектированием бытовых электросетей и конструированием бытовой электротехники.

**Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей.** — 14-е изд., перераб. и доп. 1988. — 288 с., ил. — (в обл.) Цена 85 к.

Приводится порядок организации эксплуатации оборудования и сооружений электрических станций, тепловых и электрических сетей. Тринадцатое издание вышло в 1977 г. В четырнадцатом издании отражены изменения в структуре и техническом уровне эксплуатации и ремонта в энергосистемах и на энергетических предприятиях. Правила обязательны для персонала тепловых и гидравлических электростанций, объектов электрических и тепловых сетей всех министерств и ведомств.

Для инженерно-технических работников и эксплуатационного персонала энергетических предприятий.

Заказы на эти книги следует направлять по адресу: 196066, Санкт-Петербург, Московский пр., 189, книжный магазин «Энергия» отдел «Книга—почтой».



Э Н Е Р Г О А Т О М И З Д А Т

---

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ КНИЖНЫЙ МАГАЗИН  
«ЭНЕРГИЯ» — ОПОРНЫЙ ПУНКТ ЭНЕРГОАТОМИЗДАТА**

Это значит, что здесь самый широкий ассортимент научной, учебной, производственной и справочной литературы по всем разделам энергетики:

теплотехнике и теплоэнергетике,

гидротехнике и гидроэнергетике,

электроэнергетике и промышленной энергетике,

электротехнике и промышленной электронике,

автоматике и информационно-измерительной технике,

ядерной энергетике, технологии и физике.

Магазин принимает заказы на книги, намеченные к выпуску и имеющиеся в наличии.

**Специалисты энергетического профиля!**

Указав адрес организации или свой домашний адрес, Вы будете систематически получать все рекламные материалы по интересующей Вас тематике и бланки заказа книг Энергоатомиздата.

Адрес магазина «Энергия»: 196066, Санкт-Петербург, Московский пр., 189.

Пользуйтесь услугами магазина — опорного пункта

**Э Н Е Р Г О А Т О М И З Д А Т А**

12.

---

8