

**МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ РФ  
ДЕПАРТАМЕНТ КАДРОВ И УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
САМАРСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ТРАНСПОРТА им. М.Т.ЕЛИЗАРОВА**

---

**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ И  
ТОКОВЕДУЩИЕ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

Учебное пособие для студентов  
специальности 101800 - "Электроснабжение  
железнодорожного транспорта"

Составитель: В.Н.Яковлев

Самара 2002

УДК 521.331.4  
621.331.4

Учебно-методическое пособие по дисциплинам “Тяговые и трансформаторные подстанции”, “Городской электрический транспорт” для студентов специализации 101800 – “Электроснабжение железных дорог”.- Самара: СамИИТ.- 2001.- 65 с.

В пособии приведена разновидность быстродействующих предохранителей для защиты полупроводниковых установок, приведены их технические параметры. Рассмотрены назначение конструкции и принцип действия предохранителей, а также основные характеристики длительного режима: номинальное напряжение, потери мощности, зависимость номинального тока от внешних факторов. Изложены защитные характеристики предохранителей, материалы плавких вставок и наполнители современных предохранителей.

В пособии приведена классификация изоляторов и их характеристики, рассмотрены шинопроводы и их основные технические данные, кабельные линии и их применение, выбор токоведущих частей и кабелей.

Составитель: Вениамин Николаевич Яковлев

Рецензенты: Начальник службы Электроснабжения Самарского метрополитена  
В.В.Ларкин  
к.т.н., доцент кафедры “Электроснабжение  
железнодорожного транспорта” Н.А.Шергунова

Подписано в печать 29.04.02  
Заказ № 54 Тираж 100

## 1. Плавкие предохранители

Предохранитель – это коммутационный электрический аппарат, предназначенный для отключения защищаемой цепи посредством разрушения специально предусмотренных для этого токоведущих частей под действием тока, превышающего определённое значение, с последующим гашением возникающей электрической дуги. Предохранитель является простейшим аппаратом РУ, защищающим электрическую установку от перегрузок и тока КЗ.

Ценными свойствами плавких предохранителей являются:

- простота устройства и, следовательно, низкая стоимость;
- исключительно быстрое отключение цепи при КЗ;
- способность предохранителей некоторых типов ограничивать ток КЗ.

Следует, однако, отметить, что характеристики предохранителей таковы, что:

- они не могут быть использованы для защиты цепей при перегрузках;
- избирательность отключения участков цепи при защите её предохранителями может быть обеспечена только в радиальных сетях;
- автоматическое повторное включение цепи после её отключения предохранителем возможно только при применении предохранителей многократного действия более сложной конструкции;
- отключение цепей плавкими предохранителями связано обычно с перенапряжениями;
- возможны однополюсные отключения и последующая ненормальная работа участков системы, и поэтому в электроустановках свыше 1 кВ предохранители имеют ограниченное применение;
- их используют, в основном, для защиты силовых трансформаторов, измерительных трансформаторов напряжения и статических конденсаторов.

Предохранители появились одновременно с электрическими сетями. Широкое применение предохранителей в самых различных областях народного хозяйства и в быту привело к многообразию их конструкций. В электрических сетях до 1 кВ получили распространение предохранители типов ПР (предохранитель с разборным патроном без наполнителя), ПН (предохранитель с наполнителем и с разборным патроном), НПН (предохранитель с наполнителем и с неразборным патроном), а также быстродействующие предохранители типов ПНБ, ПБВ и ПБФ.

В электрических сетях выше 1 кВ получили распространение предохранители типов ПК (предохранитель с кварцевым наполнителем), ПКТН (предохранитель кварцевый для трансформаторов напряжения), ПСН (предохранитель стреляющий наружной установки), ПСКУ (предохранитель стреляющий наружной установки управляемый) и выхлопные предохранители типа ПВТ. Разновидностями предохранителей являются ПКУ (усиленный) и ПКЭ (для экскаваторов).

Предохранители типа ПНБ на метрополитенах применяют для защиты вентильных ветвей некоторых кремневых выпрямителей.

В условном обозначении предохранителя первая цифра после обозначения серии показывает номинальное напряжение, кВ; вторая – номинальный ток патрона предохранителя, А; третья – номинальный ток плавкой вставки, А; четвёртая – номинальный ток отключения, кА.

Предохранители низкого напряжения изготавливаются на токи от миллиампер до тысяч ампер и на напряжение до 600 В, а предохранители высокого напряжения – до 35 кВ и выше.

Предохранитель характеризуется номинальным напряжением и номинальным током плавкой вставки, номинальным током предохранителя, предельным током отключения и др.

Номинальным током предохранителя называется ток, на который рассчитаны его токоведущие части и контактное устройство, а номинальным током плавкой заставки – ток, который длительно протекает по плавкой

заставке, не вызывая её плавления. Предельным отключаемым током называется наибольший ток КЗ, который способен отключить предохранитель без повреждения своих частей.

Для предохранителей переменного тока с номинальным напряжением от 3 до 220 кВ включительно установлены следующие значения номинальных токов:

- номинальные токи предохранителя, А 8; 10; 20; 32; 40; 50;  
80; 160; 200; 320; 400.
- номинальные токи плавких вставок, А 2; 3,2; 5; 8; 10; 16; 20; 32;  
40; 50; 80; 160; 200; 320; 400.
- Номинальные токи отключения, кА 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5;  
16; 20; 25; 31,5; 40.

Отечественные аппаратные заводы выпускают плавкие предохранители для напряжений до 110 кВ включительно.

Важной характеристикой предохранителя является зависимость времени перегорания плавкой вставки от тока – времятоковая характеристика. Для совершенной защиты необходимо, чтобы времятоковая характеристика предохранителя (рис.1, кривая 1) во всех точках шла немного ниже характеристики защищаемой цепи или объекта (кривая 2). Однако кривая 3 (реальная характеристика предохранителя) пересекает кривую 2.

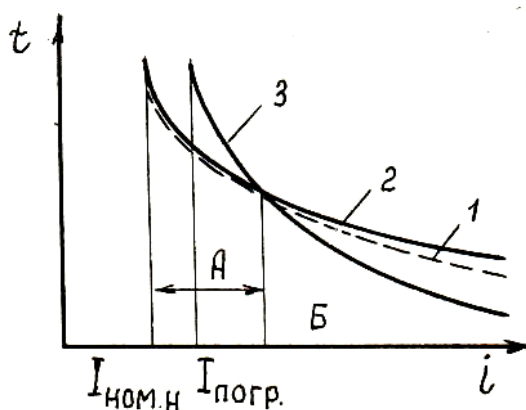


Рис.1. Согласование характеристик предохранителя и защищаемого объекта

Поясним это. Если характеристика предохранителя соответствует кривой 1, то он будет перегорать из-за старения или при пуске двигателя. Цепь будет отключаться при отсутствии недопустимых перегрузок. Поэтому ток плавления вставки выбирается больше номинального тока нагрузки. При этом кривые 2 и 3 пересекаются. В области больших перегрузок (область Б) предохранитель защищает объект. В области А предохранитель не защищает объект.

При больших перегрузках (1,5...2)  $I_{НОМ}$  нагрев предохранителя протекает медленно. Большая часть тепла отдаётся окружающей среде. Сложные условия теплоотдачи затрудняют расчёт плавкой вставки.

Ток, при котором плавкая вставка сгорает при достижении ею установившейся температуры, называется пограничным током  $I_{ПОГР}$ . Для того, чтобы предохранитель не срабатывал при номинальном токе  $I_{НОМ}$ , необходимо, чтобы  $I_{ПОГР} > I_{НОМ}$ . С другой стороны, для лучшей защиты значение  $I_{ПОГР}$  должно быть возможно ближе к номинальному. При токах, близких к пограничному, температура плавкой вставки должна приближаться к температуре плавления.

Защитные характеристики, представляющие собой зависимости времени плавления или времени отключения цепи от соответствующих значений тока, неизменного во времени, показаны на рис.2.

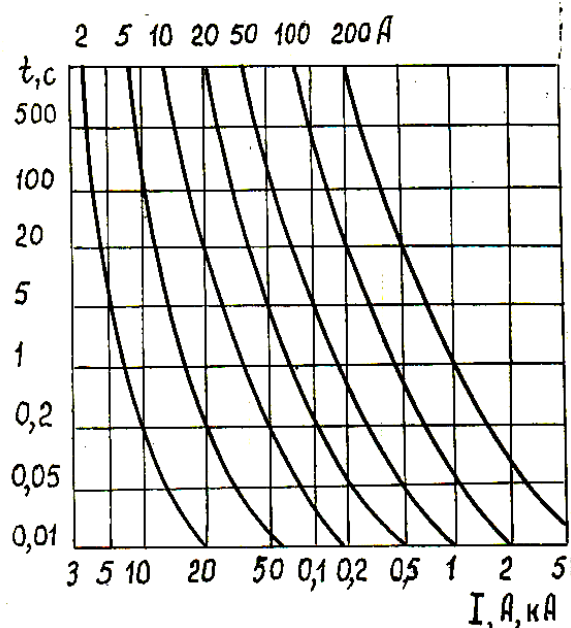


Рис.2. Зависимость времени плавления плавкой вставки

## от тока в предохранителях ПКТ

Интервалы времени установлены в пределах от 0,01с до 1 часа. Защитные характеристики предохранителей необходимы для координации их действия с действием других предохранителей и выключателей. Они могут быть получены только при испытании, и сообщаются заводами-изготовителями. Как видно из рис.2, по мере увеличения номинального тока плавкой вставки характеристики смещаются вправо. Значение тока, при котором плавкая вставка предохранителя плавится в течение 1 часа, должно быть более 130% и менее 200% номинального тока вставки.

По диапазону токов отключения предохранители ПКТ подразделяются на класс 1 с диапазоном от одночасового тока плавления до номинального тока отключения (общее применение) и класс 2 с диапазоном от нормированного минимального тока, превышающего одночасовой ток плавления, до номинального тока отключения (рис.2). При отключении токов большей кратности по отношению к номинальному току плавкой вставки предохранитель работает с токоограничением (рис.3).

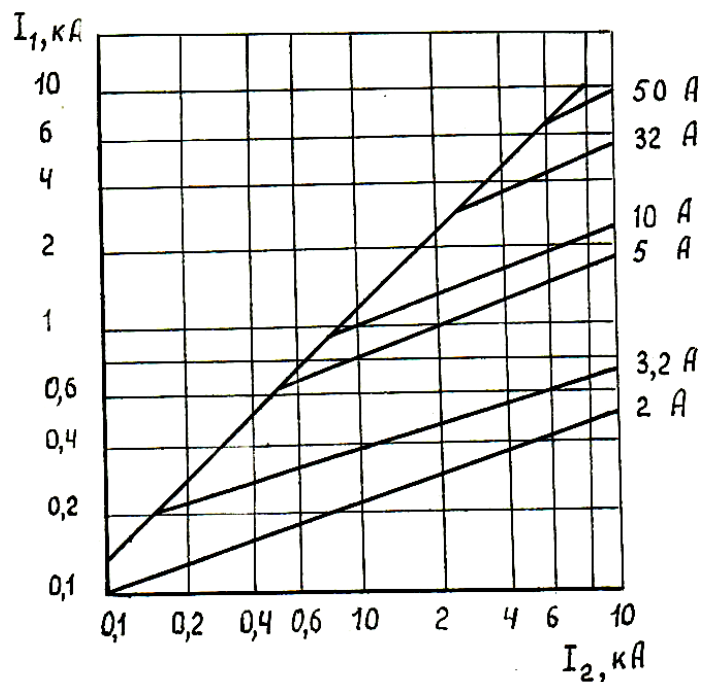


Рис.3. Характеристика токоограничения предохранителя ПКТ:  
 $I_1$  – наибольший ток в цепи предохранителя;  $I_2$  – расчётный

## ток КЗ для номинальных токов плавких вставок 2-50 А

Как видно из рисунка, ограничение тока имеет место при отключённом (расчётном) токе  $I_2$ , превышающим некоторое минимальное значение, зависящее от номинального тока вставки. Чем меньше последний, тем заметнее токоограничивающее действие предохранителя.

В связи с тем, что время плавления вставки при пограничном токе велико (более 1 ч), а температура плавления материала составляет много сотен градусов Цельсия, все детали предохранителя нагреваются до высоких температур. Происходит тепловое старение плавкой вставки.

Наибольшая температура частей предохранителя, заряженного любой из предназначенных для него плавких вставок, при температуре воздуха  $+40^{\circ}\text{C}$  не должна превышать значений, указанных в табл.1.

Таблица 1

## Наибольшие допустимые температуры частей предохранителей

Наименование частей	Наибольшая температура, $^{\circ}\text{C}$
Токоведущие части, кроме находящихся внутри патрона.	105
Патрон из керамического изоляционного материала в наиболее нагретой точке поверхности.	155
Патрон из органического изоляционного материала в наиболее нагретой точке поверхности.	100

Если ток, проходящий через вставку, в 3-4 раза больше номинального, то, практически, процесс нагрева идёт адиабатически, т.е. всё тепло, выделяемое плавкой вставкой, идёт на её нагрев. После того, как температура плавкой вставки достигла температуры плавления, начинается сложный процесс плавления, переход вставок из твёрдого состояния в жидкое. Однако, как правило, электрическая дуга загорается раньше, чем вставка полностью перейдёт в жидкое состояние. Наличие перешейков уменьшенного сечения позволяет резко снизить время с момента начала КЗ до появления дуги.



Процесс гашения дуги начинается до момента достижения током КЗ установившегося или даже амплитудного значения. Дуга образуется через время  $t_1$  после начала КЗ, когда ток в цепи значительно меньше установившегося значения (рис.4).

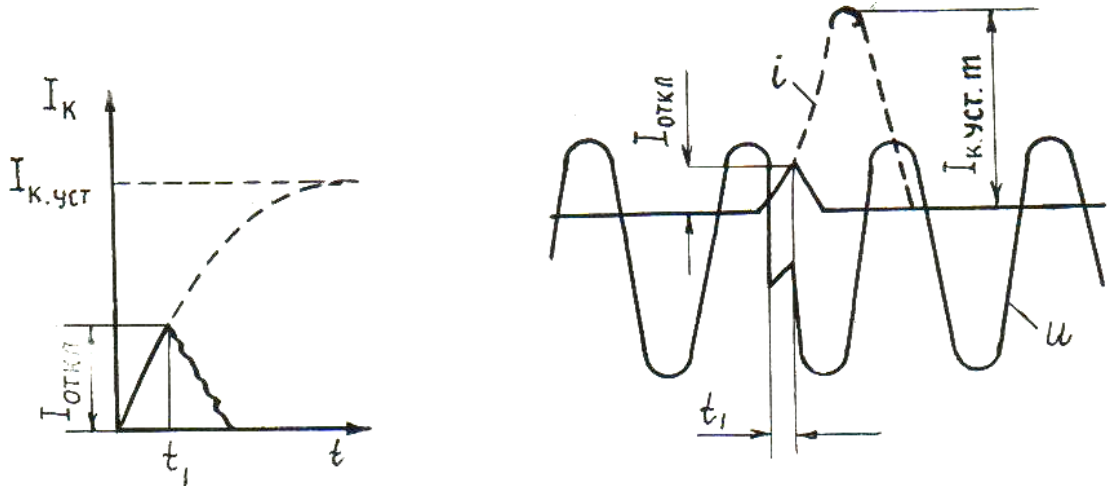


Рис.4. Отключение постоянного и переменного тока предохранителем с токоограничением

Средства дугогашения позволяют погасить дугу за миллисекунды. При этом проявляется эффект токоограничения, показанный на рис.4. При отключении повреждённой цепи с токоограничением обеспечивается гашение дуги, так как отключается не установившийся ток КЗ, а ток, определяемый временем плавления вставки. Ток КЗ при этом ограничивается до значения  $I_{откл}$ .

С ростом номинального тока возрастает, естественно, и минимальное сечение вставки. Увеличение этого сечения приводит к возрастанию длительности плавления вставки и уменьшению эффекта токоограничения. Интенсивный отвод тепла от вставки при номинальном режиме позволяет выбрать уменьшенное сечение вставки и повысить эффект токоограничения.

Токоограничивающая способность предохранителей зависит от номинального тока вставки, значения ожидаемого тока КЗ и фазы включения (наличие и значение апериодической составляющей тока КЗ). Чем больше номинальный ток плавкой вставки, тем ниже токоограничивающее действие плавкого предохранителя. Так, при  $I_{НОМ} = 400$  А токоограничение почти отсутствует.

При отключении цепи токоограничивающими предохранителями в ней могут возникнуть перенапряжения, тем большие, чем быстрее снижается ток в цепи. Ограничение перенапряжения достигается конструкцией плавких вставок. Перенапряжения, которые возникают при срабатывании токоограничивающих высоковольтных предохранителей, нормируются ГОСТ 2213-79. Срабатывание высоковольтного предохранителя зависит от значения и длительности воздействия сверхтока, от значительных перенапряжений при токоограничении и т.д.

Полное время отключения токоограничивающих предохранителей при токах КЗ составляет 0,005-0,007 с.

К недостаткам высоковольтных предохранителей следует отнести: одноразовое действие, необходимость перерыва в работе защищаемой цепи для замены использованной плавкой вставки (перегоревшей вставки) или патрона с плавкой вставкой.

К предохранителям всех серий предъявляются следующие требования:

- времятоковая характеристика плавления (отключения) предохранителя должна проходить ниже аналогичной характеристики защищаемого объекта, причём, возможно ближе к ней;
- при КЗ предохранители должны работать селективно, т.е. должна отключаться только повреждённая линия;
- характеристики предохранителя должны быть стабильными, а их допустимые отклонения не должны нарушать защитные свойства предохранителя;
- предохранители должны иметь высокую отключающую способность и высокую надёжность;
- замена элемента предохранителя любой конструкции должна осуществляться за минимальное время.

Основные технические требования к предохранителям изложены в ГОСТ 2213-79, “Предохранители переменного тока на напряжения 3 кВ и выше. Общие технические условия”.

**Принцип работы** всех предохранителей основан на плавлении калиброванной проволоки (плавкой вставки) при прохождении через неё тока больше номинального. Чем больше кратность прохождения тока по отношению к номинальному значению предохранителей, тем меньше время плавления проволоки. Наиболее приемлемым материалом плавкой вставки следует считать медь, несмотря на её высокую температуру плавления ( $1080^{\circ}\text{C}$ ). Для сокращения времени и снижения температуры, под воздействием которых оказываются элементы предохранителя, используется металлургический эффект – на медные плавкие проволоки напаивают оловянный шарик, который плавится при  $230^{\circ}\text{C}$ , расплавляя в себе более тугоплавкий металл – медь. Плавкая вставка предохранителя является его сменной частью. Плавкие вставки изготавливают из свинца, сплавов свинца, цинка, алюминия, серебра и др.

Гашение электрической дуги, возникающей после перегорания плавкой вставки, должно быть осуществлено в возможно короткое время. Время гашения зависит от конструкции предохранителя и принятого способа гашения. По способу гашения дуги предохранители разделяют на открытые, закрытые и закрытые с кварцевым наполнителем. У открытых предохранителей дуга гаснет в результате увеличения расстояния между электродами; в закрытых – из-за создания большого давления в патроне, куда помещена плавкая вставка, и стремительного потока газов к открытым концам патрона; в закрытых с кварцевым наполнителем – за счёт большого местного давления и деионизации дуги, соприкасающейся с поверхностью множества песчинок.

#### **Конструкция предохранителей высокого напряжения.**

Предохранители высокого напряжения имеют то же назначение и тот же принцип, что и предохранители до 1 кВ.

Предохранители серии ПК с мелкозернистым наполнителем выполняются на напряжения 3, 6, 10, 35 кВ и номинальные токи 400, 300, 200 и 40 А

соответственно. Эти предохранители обладают токоограничивающим эффектом, полное время отключения при токах КЗ 0,005-0,007 с.

Для защиты силовых трансформаторов, воздушных и кабельных линий напряжением 3-35 кВ применяют предохранители токоограничивающие типов ПКТ, а для защиты трансформаторов напряжения – ПКН.

Предохранители ПКТ изготавливают на номинальные токи: ПКТ 101-2-31,5А; ПКТ 102-31,5-80 А; ПКТ 103-50-100 А; ПКТ 104-100-200 А. Предохранители ПКН на номинальное напряжение 10 кВ могут быть применены в цепях с номинальным напряжением 3 кВ.

Основные составные элементы современных конструкций предохранителей с мелкозернистым наполнителем:

- основание предохранителя – опорная несъёмная часть предохранителя, содержащая: изоляторы, цоколь (может отсутствовать), контакты для установки в них заменяемого элемента или его держателя, выводы для присоединения внешней цепи, устройства для сигнализации, блокировки и управления (могут отсутствовать);
- держатель заменяемого элемента – съёмная часть предохранителя, предназначенная для крепления в ней заменяемого элемента. Держатель может быть концевым (для закрепления каждого конца патрона) или представлять собой полный изоляционный корпус с деталями для крепления заменяемого элемента и др. у выхлопных предохранителей. В последнем случае внутренние стенки корпуса держателя могут быть использованы в качестве газогенерирующего материала для дугогашения;
- ударное устройство – часть предохранителя, которая при его срабатывании освобождает нормированную механическую энергию, способную вызвать срабатывание другого аппарата, механизма откидывания заменяемого элемента (держателя) или устройства сигнализации, блокировки и управления;

- указатель срабатывания – часть предохранителя, предназначенная для указания в месте расположения предохранителя, сработал ли он, т.е. произошло ли сплавление плавкой вставки;
- заменяемый элемент предохранителя, подлежащий замене после его срабатывания и представляющий собой: у предохранителей с мелкозернистым наполнителем – один или более патронов, у предохранителей выхлопных – плавкую вставку с дополнительными деталями крепления;
- патрон предохранителя – съёмная часть токоограничивающего предохранителя с мелкозернистым наполнителем, представляющая собой закрытый изоляционный корпус с контактными наконечниками, содержащий: плавкую вставку, мелкозернистый наполнитель, указатель срабатывания или ударное устройство;
- плавкая вставка предохранителя – часть заземляемого элемента предохранителя, предназначенная для расплавления под действием тока, превышающего определённое значение, в течение определённого времени.

Предохранители типа ПКТ и ПКН (рис.5,а) состоят из фарфоровой или

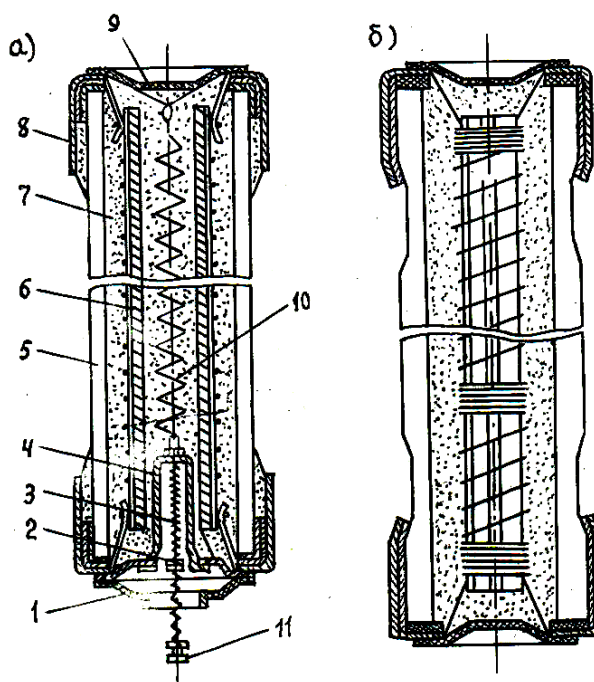


Рис.5. Предохранитель ПКТ и ПКН с кварцевым наполнителем: а – силовой патрон предохранителя ПКТ с керамическим сердечником; б – патрон предохранителя ПКН; 1,9 – крышки; 2 – указатель срабатывания; 3,4 – соответственно пружина и корпус указателя; 5 – патрон; 6 – керамический сердечник; 7 – кварцевый песок; 8 – контактный колпачок; 10 – вставка указателя; 11 – указатель срабатывания

стеклянной трубки, армированной по торцам латунными колпаками.

Наполнитель в виде сухого кварцевого песка засыпается через отверстие в колпаке, которое после засыпки запаивается крышкой. В предохранителях на ток до 7,5 А медная плавкая вставка наматывается на керамический сердечник. Это позволяет увеличить длину плавкой вставки и эффект токоограничения, а, следовательно, повысить отключаемый ток. При номинальных токах, превышающих 7,5 А плавкая вставка выполняется в виде параллельных спиралей (рис.5,б). Применение параллельных вставок позволяет изготавливать их из меди или серебряной проволоки малого диаметра и сохранять эффект узкой щели в процессе дугогашения. Для снижения температуры предохранителя при небольших длительных перегрузках плавкие вставки имеют оловянные шарики.

Предохранитель имеет указатель срабатывания. На указателе действует пружина, которая удерживается во втянутом состоянии специальной плавкой вставкой. Эта вставка перегорает после перегорания основных вставок. При этом указатель освобождается и выбрасывается в положение 11 с силой, определяемой пружиной. Этот указатель можно использовать после отключения КЗ предохранителем.

При КЗ плавкая вставка испаряется по всей длине и в цепи вводится длинная дуга, горящая в узкой щели и имеющая высокое сопротивление, особенно в начальной стадии, когда пары металла недостаточно ионизированы. Для ограничения возникающих при этом перенапряжений применяются вставки переменного сечения. Вначале сгорает участок меньшего сечения, а затем большего. В результате длина дуги растёт медленней.

Предохранители с мелкозернистым наполнителем обладают токоограничением, особенно при больших токах КЗ. В длительном режиме интенсивное охлаждение тонких плавких вставок позволяет выполнить их с минимальным сечением и снизить ток плавления. Как уже говорилось выше, с ростом номинального тока эффект токоограничения падает. Номинальный ток отключения предохранителей достигает 20 кА при напряжении до 10 кВ.

Предохранители серии ПКТН, применяемые для защиты трансформаторов напряжения, в отличие от ПК имеют константановую вставку, намотанную на керамический сердечник. Указатель срабатывания у них отсутствует, о перегорании судят по показаниям приборов, включённых во вторичную цепь трансформаторов напряжения. Благодаря малому сечению плавкой вставки предохранители ПКТН создают значительный токоограничивающий эффект. Они могут быть установлены в сети, где мощность КЗ достигает 1000 МВ·А, а для некоторых типов (ПКТУ) отключаемая мощность не ограничивается.

Предохранители серий ПК и ПКТН работают бесшумно, без выброса пламени и раскалённых газов. Для нормальной работы предохранителей особое значение имеет герметизация. При проникновении влаги в предохранитель он теряет свойство дугогашения. Перезарядка предохранителя в эксплуатации не допускается.

Выхлопные предохранители типа ПВТ с автогазовым гашением дуги (ранее назывался ПСН - стреляющий, для наружной установки) выполняются на напряжение 10, 35 и 110 кВ.

Основной частью предохранителя является газогенерирующая трубка 2 (рис.6,б), внутри которой расположен гибкий проводник 3, соединённый с плавкой вставкой 4 и контактными наконечником 1. Параллельно медной вставке расположена стальная 5, воспринимающая усилие пружины, стремящейся вытащить гибкий проводник. Головка патрона предохранителя 1 (рис.6,а) зажата специальным держателем на изоляторе 2. На нижнем изоляторе на оси 4 укреплен контактный нож 5 со спиральной пружиной, которая

стремится повернуть нож в положение 8'. Нож охватывает шейку контактного наконечника 6.

При КЗ сначала расплавляется медная, а затем стальная вставка. Под действием пружины нож 5 поворачивается и выбрасывается гибкий проводник. Дуга, образовавшаяся после расплавления вставок, затягивается в трубку, где интенсивно выделяется газ. Давление в трубке достигает 10-25 МПа, создаётся интенсивное продольное автодутьё, гасящее дугу. Гашение сопровождается выбросом раскалённых газов и мощным звуковым эффектом – выстрелом. Гашение тока происходит при естественном переходе через нуль, поэтому перенапряжение не возникает.

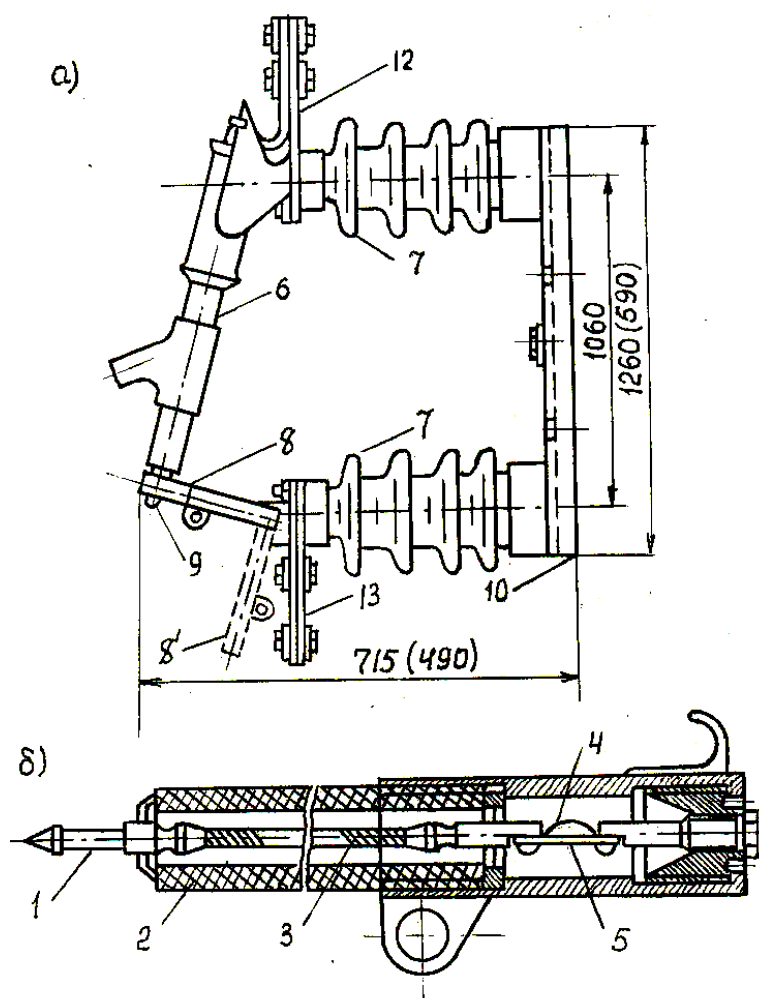


Рис.6. Предохранитель типа ПВТ-35 (в скобках размеры для ПВТ-10):

а – общий вид; б – патрон предохранителя; 1,9 – контактный наконечник; 2 – газогенерирующая трубка; 3 – гибкий проводник; 4 –



плавкая вставка; 5 – стальная пружина; 6 – патрон предохранителя; 7 – изолятор; 8 – контактный нож; 10 – стальной цоколь; 12,13 - выводы

Плавкая вставка в нормальном режиме нагревается до высокой температуры. Чтобы не происходило газообразование, вставка размещена не в трубке, а в металлическом колпаке, закрывающем один конец трубки.

Предохранители типа ПНБ выполняются из фарфоровой трубки, металлических крышек, контактных ножей и медных плавких вставок. Внутри патрон заполняется сухим кварцевым песком, который имеет хорошие изоляционные свойства. Ограничение перенапряжения достигается испарением участка плавкой вставки меньшего сечения. Быстродействие предохранителей этого типа достигается изготовлением плавкой вставки из серебра. В целях интенсивного охлаждения предохранителя участок плавкой вставки меньшего сечения заключается между двумя фаянсовыми пластинками.

Обобщённые данные об основах конструирования, расчёта, испытания, выбора предохранителей и т.п. изложены Р.С. Кузнецовым в [1].

**Выбор предохранителей.** Предохранители по напряжению до 1 кВ выбирают по номинальным параметрам: напряжению  $U_H$  и длительному току, а также по току отключения  $I_{откл.н}$ .

Предохранители напряжением свыше 1 кВ выбирают по номинальному напряжению  $U_{ном}$ , номинальному току  $I_{ном}$  и номинальному току отключения  $I_{откл.н}$ . Выбор по напряжению определяется условием:

$$U_{уст} \leq U_{ном}.$$

Предохранители типа ПК (с заполнением кварцевым песком) можно применять только в сетях с напряжением, равным номинальному напряжению предохранителя.

Выбирают предохранители в соответствии с их защитными характеристиками, т.е. по условиям избирательности (селективности) действия защиты, а также с учётом пусковых токов электродвигателей, бросков токов намагничивания трансформаторов согласно данным табл.2.

Выбор предохранителя по току отключения определяется условием:

$$I_{по} \leq I_{откл.н.}$$

В соответствии с ПУЭ все аппараты и проводники, защищённые плавкими предохранителями с вставкой не более 60 А, не проверяют на термическую и электродинамическую устойчивость.

Таблица 2

### Выбор предохранителей

Номинальный ток защищаемого электрооборудования	Номинальный ток выбираемого предохранителя	Номинальная мощность защищаемого электрооборудования, кВ·А		
		1 кВ	6 кВ	10 кВ
А	А			
0,5	2	-	5	10
1	3	5	10	20
1,9	5	10	20	30
3	7,5	-	30	50
5	10	20	50	75
8	15	30	75	100
10	20	50	100	180
14,5	30	75	135	240
20	40	100	180	320
30	50	-	320	560
54	75	240	560	750

## 2. Быстродействующие плавкие предохранители

**Назначение и конструкция предохранителя.** Для защиты полупроводниковых установок различного назначения от токов КЗ и перегрузок широко применяются быстродействующие плавкие предохранители. Номинальные данные для ряда типов таких предохранителей содержатся в табл.3, для отдельных конкретных типов быстродействующих предохранителей - в табл.4.

В настоящее время в СНГ и за рубежом разработаны десятки массовых серий быстродействующих предохранителей. В СНГ выпускаются

быстродействующие предохранители ПП57. Осваиваемые в настоящее время промышленностью предохранители серии ПП59, ПП60 могут быть использованы как для вентильной, так и для фидерной защиты. Предохранители ПП59 имеют малые значения джоулева интеграла отключения и обладают повышенным быстродействием. В настоящее время осваиваются в производстве быстродействующие

Таблица 3

Разновидность быстродействующих предохранителей для защиты полупроводниковых установок

Серия, тип	Назначение, общие сведения	Номинальные данные		
		Напряжение, В		Ток, А
		посто- янное	перемен- ное	
ППД-12	Линейные предохранители общепромышленного и тропического исполнения.	1850	-	1600-6300
ПП-61	Для защиты силовых вентилях токов перегрузки и короткого замыкания, имеют кнопочную плавкую вставку.	-	380	40-160
ПП-71	Для защиты вентилях бесщеточных систем возбуждения турбогенераторов:	1000-1300	-	550-750
ПП-41	применяются с принудительным воздухоохладителем.	440	750	250-630
ПП-51	Для защиты вентилях от типов короткого замыкания. Для защиты вентилях от типов короткого замыкания.	-	330	33-400

Таблица 4

Технические параметры некоторых быстродействующих предохранителей

Тип	Ток, А	Напряж ение, В	Интеграл квадрата тока, А <sup>2</sup> ·с	Предельный ток отключения, кА	Относительн ое перенапряже ние
ППД12-43133	1600	150	1100	100	1,6
ППД12-40433	6300	450	3000	200	1,8
ПП51-3340354	160	380	10	-	-
ПП41	31-630	760	1350 при 630 А	100	1,5
ПП57-31	100	до 600	1,4	-	-
ПП57-34	250	до 660	1,3	-	-
ПП57-37	400	до 660	140	-	-
ПП57-39	630	до 1150	300	-	-
ПП57-40	800	до 1250	-	-	-
ПП71	550-750	1300	-	40	1,5
ПП61	40-160	380	100	100	1,5

предохранители ПП60 на номинальные токи 500; 630 А и номинальные напряжения 380; 660 В. Они имеют большие преддуговой джоулев интеграл и джоулев интеграл отключения, и могут быть отнесены к так называемым инерционно-быстродействующим предохранителям. Отношение этих интегралов близко к идеальному (3,1-3,3), что обеспечивает селективность между предохранителями один к двум при токах КЗ не более  $32I_{НОМ}$ . Предохранители ПП60 отличаются высокой стойкостью к циклическим перегрузкам без снижения номинального тока. Предохранители ПП60С имеют плавкий элемент из серебра, предохранители ПП60М выполняются с медным плавким элементом и твёрдым наполнителем.

Различные типы быстродействующих предохранителей имеют свои конструктивные особенности, определяемые назначением и условиями эксплуатации. Несмотря на большое количество оригинальных конструктивных и схемных решений, в настоящее время основным типом быстродействующего предохранителя является предохранитель одноразового действия с серебряным плавким элементом и песчаным наполнителем, размещённым в фарфоровом корпусе. Простота конструкции, экономичность и надёжные защитные характеристики предохранителей явились причиной их широкого использования в различных отраслях промышленности.

На рис. 7 показана конструкция быстродействующего предохранителя серии ПП59. К корпусу из ультрафарфора с помощью винтов крепятся выводы из

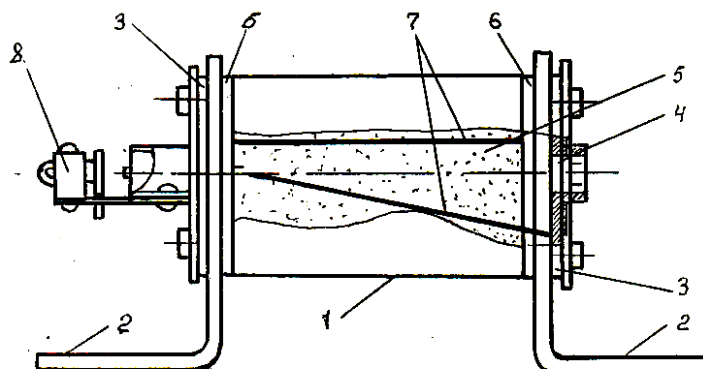


Рис.7. Конструкция быстродействующего предохранителя:  
1 – корпус; 2 – выводы; 3,6 – изоляционные прокладки; 4 – отверстие;  
5 – наполнитель (кварцевый песок); 7 – плавкие элементы; 8 - контакт

меди толщиной 4 мм, к которым привариваются плавкие элементы, имеющие участки полного и уменьшенного сечения – перешейки, соединённые друг с другом параллельно и последовательно, которые расплавляются при протекании аварийного тока. С помощью выводов предохранитель подсоединяется к шинам защищаемого объекта. Через отверстие 4, закрываемое заглушкой, предохранитель заполняется наполнителем – кварцевым песком. Для предотвращения утечки наполнителя используются изоляционные прокладки. Контакт 8 предназначен для связи с системой сигнализации и управления защищаемого объекта.

Одна из особенностей конструкции описываемых предохранителей связана с давлением, возникающим при аварийном токе. При адиабатическом нагреве и расплавлении перешейков плавких элементов, когда объём образовавшегося газа будет таким же, как объём металла перешейков в твёрдом состоянии, давление  $P$  в столбце дуги может быть определено из уравнения:

$$P = P_0 V_0 \frac{\nu}{\mu} \cdot \frac{T}{T_0}, \quad (1)$$

где  $P_0$  - нормальное давление, равное  $1,01 \cdot 10^5$  Па;  $V_0$  - молярный нормальный объём газа, равный  $22,413 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ ;  $\nu$  - плотность твёрдого вещества плавкого элемента в нормальных условиях;  $\mu$  - молярная масса газа;  $T_0$  - нормальная температура (273 К).

Приведём значения адиабатического давления  $P$  при  $T=2 \cdot 10^4$  К для плавких элементов из различных материалов:

Материал элемента .....	Ag	Cu	Al	Zn
Давление $P$ , $10^8$ Па .....	160	235	155	180

При испарении кварцевого песка адиабатическое давление  $P$  равно  $60 \cdot 10^8$  Па. При испарении 1 г меди в вакууме и температуре  $5 \cdot 10^6$  К объём её паров составляет  $7000 \text{ см}^3$ , т.е., примерно, в 75 тыс. раз превышает объём металла в твёрдом состоянии. В предохранителях с малым быстродействием (серии ПР) без наполнителя при отключении аварийного тока образуется высокое давление, которое полностью определяет их конструкцию. Естественно, отклонения от теоретического режима, характеризуемого адиабатическим нагревом и неизменным объёмом вещества, значительно снижают реальное значение давления по сравнению с расчётным. Тем не менее, во многих случаях при отсутствии наполнителя оно оказывается вполне достаточным для полного разрушения конструкции предохранителя. Например, при расплавлении цинковых перешейков предохранителей ПР с  $I_{НОМ}=200$  А,  $U_{НОМ}=380$  В под действием давления срезались девять алюминиевых шпилек общим сечением около  $180 \text{ мм}^2$ , что при прочности алюминия  $98 \cdot 10^6$  Па свидетельствует о весьма высоком давлении в корпусе.

Существенно иная картина наблюдается в предохранителях с наполнителем (кварцевый песок). Кварцевый песок физически представляет собой, так называемую, неньютоновскую жидкость (пористую структуру). Пористая структура наполнителя приводит к тому, что при давлении в столбе дуги, составляющем  $10^7$ - $10^8$  Па, давление непосредственно на стенки корпуса составляет  $(2 \div 6) \cdot 10^5$  Па. При этом изменение гранулометрического состава

наполнителя, степени его уплотнения и диаметра корпуса существенно влияет на значение давления, действующего на внутренние стенки корпуса. Снижение среднего диаметра зёрен до некоторого предела (0,1-0,2 мм) и увеличение диаметра корпуса приводят к снижению этого давления. Спектроскопическим анализом установлено, что электрическая дуга в предохранителях, наполненных песком, горит в парах кремния, давление которых в 80 раз превышает давление паров серебра. Таким образом, давление в предохранителе преимущественно определяется парами наполнителя независимо от материала плавкого элемента, и его величина непосредственно у стенок корпуса сравнительно невелика. В практике не наблюдается разрушения корпуса быстродействующего предохранителя под воздействием давления. Однако при нерациональной конструкции и нарушении технологического процесса изготовления существует опасность выброса продуктов горения дуги и ионизированных газов в местах приварки плавких элементов, что может привести к взрыву установки.

**Основные характеристики длительного режима.** Для предохранителей общепромышленного назначения, не обладающих быстродействием, номинальный ток устанавливается из учёта превышения температуры на выводах и потерь мощности. При этом вводятся вспомогательные коэффициенты, учитывающие минимальный ток плавления и максимальный ток неплавления плавкого элемента. Для быстродействующих предохранителей необходимо учитывать условия эксплуатации, характеризуемые в большинстве случаев циклическими изменениями величины и формы протекающего тока. Номинальный ток быстродействующего предохранителя, найденный согласно требованиям для общепромышленных предохранителей не совпадает со среднеквадратичным значением тока циклического режима, который предохранитель пропускает без разрушения в течение заданного срока службы. В связи с этим, номинальный ток быстродействующих предохранителей устанавливается, как и для небыстродействующих, исходя из превышения температуры на выводах и потерь мощности, а для работы в циклических

режимах вводятся коэффициенты снижения номинального тока, находящиеся в пределах 0,5-0,75. Вместе с тем, в последние годы часто предлагается принимать за номинальный ток быстродействующих предохранителей среднеквадратичное значение тока в циклическом режиме, при котором гарантируется отсутствие разрушений предохранителя в течение заданного срока службы. Диапазон таких значений номинального тока в настоящее время составляет 6,3 А-2,5 кА. Тенденция к расширению этого диапазона сохраняется и может привести к созданию быстродействующих предохранителей на номинальный ток 6,3 кА.

**Номинальное напряжение** – это максимальное напряжение электрической цепи (действующее значение), при котором обеспечивается надёжное отключение предохранителем этой цепи при её оговорённых параметрах. Напряжение на дуге быстродействующих предохранителей во время срабатывания не должно превышать 150 % напряжения защищаемой цепи, что связано с требованием защиты силовых полупроводниковых приборов от напряжений. На практике напряжение на дуге предохранителя может существенно зависеть от параметров защищаемой цепи и момента возникновения аварии. При снижении напряжения цепи постоянного тока значительно ниже номинального на предохранителе могут возникать большие перенапряжения, вызванные наличием индуктивности. Например, на предохранителе с номинальным напряжением 660 В при отключении цепи постоянного тока с напряжением 50-100 В может появляться напряжение 300 В. При некоторых видах аварий и последовательном включении двух предохранителей возможно срабатывание одного из них или обоих одновременно. В этом случае один предохранитель должен надёжно отключать цепь в аварийном режиме, а при срабатывании двух предохранителей не должны возникать перенапряжения на выводах. Номинальные напряжения наиболее распространённых быстродействующих предохранителей находятся в диапазоне 220-1600 В.



**Потери мощности** – важный показатель состояния предохранителя в процессе эксплуатации. Например, для предохранителя на номинальный ток 630А и номинальное напряжение 660 В снижение потерь мощности со 100 до 80Вт позволяет сэкономить 36 кВт·ч в год. Так, повышение потерь мощности даже на несколько процентов свидетельствует о начале разрушения плавких элементов предохранителя. Следует также отметить важность снижения потерь мощности в предохранителе для предотвращения их теплового воздействия на находящиеся вблизи элементы управления полупроводниковых приборов и изоляцию. При большом количестве предохранителей в мощных установках и длительном (до 20 лет) сроке службы, а также в связи с современной тенденцией экономии энергии, вопрос снижения этих потерь является актуальным.

**Зависимость номинального тока от внешних факторов.** Высокое быстродействие предохранителей достигается повышением плотности тока в перешейках плавких элементов, что вызывает сильный нагрев предохранителя. Поэтому такие внешние факторы, как температура окружающей среды и вид охлаждения, сечение и длина токоведущих шин, оказывают большое влияние на все характеристики выключателя. Для оценки влияния воздуха используются различные эмпирические формулы и зависимости. В среднем можно считать, что при повышении температуры окружающего воздуха на 1<sup>0</sup>С номинальное значение тока необходимо снижать на 0,5-0,7 %. Принудительное воздушное охлаждение предохранителей при скорости потока 2-10 м/с позволяет повысить номинальный ток предохранителя до 20-50 А, а водяное охлаждение, как уже отмечалось выше, до 50 %.

Около 70 % выделяемого в предохранителе тепла отводится через токоподводящие шины. Поэтому увеличение их сечения, например, на 20 % может обеспечить увеличение номинального тока на 3-5 % . По рекомендациям МЭК плотность тока в шинах должна находиться в пределах 1,0-1,6 А/мм<sup>2</sup>. Следует отметить, что увеличение сечения шин не всегда эффективно.

Длина токоведущих шин определяет размеры теплопроводящей поверхности и также влияет на нагрев предохранителя. Например, увеличение длины шин в 3-4 раза позволяет снизить превышение температуры выводов предохранителя на  $15-20^{\circ}\text{C}$  и, значит, дополнительно увеличить номинальный ток. Дальнейшее увеличение шин неэффективно.

При выборе предохранителей по току длительного режима эксплуатации следует учитывать, что номинальный ток для предохранителя устанавливается по действующему значению, а для защищаемого им силового полупроводникового прибора (СПП) – по среднему.

**Защитные характеристики предохранителей** в соответствии с рекомендациями МЭК:

1. Преддуговое время - промежуток времени между началом протекания тока, достаточно большого для того, чтобы вызвать плавление плавкого элемента, и моментом возникновения дуги.
2. Время дуги – интервал времени между моментом появления дуги и моментом её окончательного погасания.
3. Время срабатывания (или отключения) – сумма преддугового времени и времени дуги.
4. Джоулев интеграл – интеграл от квадрата тока в заданном интервале времени. Преддуговой джоулев интеграл относится к преддуговому времени предохранителя. Дуговой джоулев интеграл относится к времени дуги. Джоулев интеграл срабатывания (или отключения) относится к времени срабатывания предохранителя.
5. Ожидаемый ток цепи – ток, который будет протекать в цепи, если установленный в нём плавкий предохранитель заменён перемычкой с незначительным полным сопротивлением. С этим током соотносятся все вышеуказанные и приводимые ниже характеристики.
6. Отключающая способность – ожидаемый ток (действующее значение переменного тока), который предохранитель способен отключить при

заданном напряжении и заданных условиях, оставаясь после этого в предусмотренном состоянии.

7. Пропускаемый ток – максимальное мгновенное значение, достигаемое током в процессе отключения цепи предохранителем, когда он срабатывает так, что ток не может достичь другого максимального значения.
8. Селективность при сверхтоках – такая координация между соответствующими характеристиками двух или нескольких предохранителей или других защитных аппаратов, что при появлении сверхтоков, находящихся в данных пределах, аппарат, предусмотренный для срабатывания в этих пределах, срабатывает, тогда как другие не срабатывают.

Проверка основных защитных характеристик производится при коммутационных испытаниях, как правило, из холодного состояния предохранителя (не нагретого предварительно током). Этим же условиям соответствуют и данные, указываемые в технических условиях на предохранители, хотя на практике аварийный режим часто возникает из состояния предварительного нагрева предохранителя номинальным током. В этом случае представленные выше времена, джоулевы интегралы и пропускаемый ток снижаются на 25-45 %.

**Материалы плавких вставок.** В настоящее время для изготовления плавких вставок, как быстродействующих предохранителей, так и высоковольтных и прочих, применяется серебро, медь, цинк и свинец, сплавы из этих и других материалов.

Для изготовления плавких вставок быстродействующих предохранителей применяется, в основном, серебро; предохранителей общепромышленного назначения с наполнителем – серебро и медь. В связи с дефицитом серебра и его высокой стоимостью, работы по его замене проводятся последние десятилетия во многих странах по различным направлениям, однако, радикальное решение пока не найдено. Плавкие вставки из кадмия позволили

уменьшить габаритные размеры предохранителей на 20-25 %. Кадмий – побочный продукт при очистке цинка, представляет собой не дефицитный материал. Большое сечение перешейков, необходимое для компенсации высокого электрического сопротивления кадмия, требует большой энергии для их расплавления. Однако это компенсируется существенно более низкой температурой плавления кадмия по сравнению с серебром. В процессе исследования находятся новые сплавы: алюминий-кадмий, алюминий-медь. Введение в медь алюминия в количестве, достаточном для образования его оксида на поверхности, должно уменьшить скорость окисления сплава более чем в 8000 раз. Однако при использовании стандартной технологии получения сплава замедление окисления происходит лишь в 36 раз. При применении специальной технологии сплав на основе 95 % Cu + 5% Al должен обеспечить защиту от окисления в воздухе при температуре до 800<sup>0</sup>C.

Разработан специальный эвтектический сплав золото-кремний с содержанием кремния 3,12 % и температурой плавления 360<sup>0</sup>C, обеспечивающий высокую циклическую стойкость предохранителей и надёжность при отключении малых аварийных токов. Влияние механических напряжений и эффекта старения в плавких вставках из этого сплава сведено к минимуму, и срабатывание предохранителя происходит только при достижении тока плавления.

Известны сочетания серебряных и медных участков плавкой вставки. Существует направление по созданию сплавов на основе серебра Ag-ZrO<sub>2</sub>, Ag-8% Sn, Ag-Ni. Механическая прочность на разрыв сплава Ag-ZrO<sub>2</sub> при температуре 300-700<sup>0</sup>C в 4-5 раз выше, чем у чистого серебра, при более высокой химической стойкости.

До настоящего времени ни одно из известных авторов направлений не привело к полному исключению серебра из конструкции плавкой вставки при сохранении требуемых защитных характеристик предохранителей. Поэтому целесообразно изучить основные физические свойства алюминия и меди, близких к серебру, и на основе сопоставительного анализа попытаться

рассмотреть возможность их использования (без дорогостоящей разработки и освоения новых материалов и сплавов) с помощью одних лишь конструктивных средств.

В серебре благоприятно сочетаются электрофизические, механические и другие свойства, что обеспечивает длительную надёжную работу быстродействующих и других предохранителей при высокой плотности номинального тока и надёжное отключение аварийного тока с требуемыми защитными характеристиками. Поведение серебра в различных средах характеризуется высокой термодинамической устойчивостью, формированием на его поверхности пассивных защитных плёнок и способностью образовывать в растворах комплексные ионы. При температуре, меньшей точки плавления, серебро обладает значительной стойкостью к образованию оксида. В расплавленном серебре растворяется большое количество кислорода, которое при затвердевании выделяется из раствора в виде оксида серебра или расслаивается в металле в виде пузырьков. Серебро слабо подвержено окислению. Оксидная плёнка  $\text{Ag}_2\text{O}$  нестойкая и разрушается под действием механических усилий и повышенной (до  $200^\circ\text{C}$  и выше) температуре. Слабая химическая активность серебра характеризуется малой энергией образования его соединений с кислородом, серой, углеродом, равной 31 кДж/моль.

По ряду других особенностей и характеристик будем сравнивать серебро с алюминием и медью применительно к предохранителям на один и тот же номинальный ток.

**Алюминий** – металл высокой коррозионной стойкости и пластичности. Это очень реакционно-способный металл с высоким сродством к кислороду. Обладает высокой стойкостью к большинству самых различных химических реагентов. Эта стойкость обеспечивается оксидной плёнкой, образующейся на его поверхности. В результате в большинстве сред скорость коррозии алюминия быстро падает со временем. На только что обработанной поверхности толщина оксидной плёнки примерно за  $10^{-5}$ с достигает  $10^{-9}$ м. Дальнейший рост её толщины зависит от температуры и влажности среды.

Установлено, что основная доля коррозионного разрушения алюминия с потерей прочности 5-40 % происходит в первый год. При высоких температурах и низкой влажности алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью к любым газовым средам, за исключением галогенов и их смесей. Механическая прочность у алюминия, примерно, вдвое меньше, чем у серебра. При повышении температуры прочность алюминия снижается. Вблизи температуры плавления алюминий, как и серебро, имеет низкую прочность на разрыв – порядка  $(5\div 8)\cdot 10^6$  Па. При снижении температуры механические свойства алюминия, как и серебра, улучшаются. Алюминий активно взаимодействует с водой, водными растворами кислот и щелочей.

Сопоставление характеристик предохранителей на один и тот же номинальный ток и одно и то же напряжение с плавкой вставкой из серебра и алюминия свидетельствует о следующем. Более высокое (в 1,8 раза) значение удельного электрического сопротивления алюминия может быть скомпенсировано увеличением сечения плавкой вставкой. При этом можно достичь того же температурного режима и обеспечить те же потери мощности. Установлено, что при идентичности формы плавкой вставки увеличение его сечения вдвое и применение выводов из алюминия сечением в 2,5 раза больше по сравнению с медными, обычно используемыми в быстродействующих предохранителях, обеспечивает, практически, такой же тепловой режим, как и при использовании вставок из серебра. Например, для предохранителя с номинальным током 400 А и номинальным напряжением 660 В температура на выводах составляет  $82-87^{\circ}\text{C}$ , а потери мощности - 50-60 Вт. В номинальном режиме, когда температура перешейков не превышает  $300^{\circ}\text{C}$ , оксидная плёнка лишь  $(3\div 6)\cdot 10^{-10}$  м, что увеличивает сопротивление предохранителя на 0,1-0,3 % и обеспечивает защиту металла от дальнейшего окисления и, значит, стабильность его электрических характеристик.

Преддуговой интеграл предохранителя с плавкой вставкой из алюминия в 1,9-2 раза больше, чем у предохранителя с плавкой вставкой из серебра на те же

номинальный ток и напряжение. Эксперименты при  $I_K \leq 100$  кА показали одинаковое значение пропускаемых токов у плавких вставок из алюминия и серебра. Это можно объяснить более высокой скоростью роста напряжения на дуге при расплавлении перешейков из алюминия ( $10^6$  В/с), чему способствует наличие оксидной плёнки, обеспечивающей инерционное накопление и последующее взрывное рассеивание энергии, а также более высокое катодное падение у алюминия (16,2-18,6 В) по сравнению с серебром (12,1-13,6 В).

Алюминий отличается исключительно высоким значением энергии образования соединений с кислородом, серой, углеродом, равным 1673 кДж/моль. Аналогичные значения для серебра и меди равны соответственно 31 и 168 кДж/моль.

При переменном токе значение рассеиваемой в дуге энергии одинаково для алюминиевых и серебряных плавких вставок. В режиме отключения токов КЗ джоулевы интегралы отключения предохранителей с плавкими вставками из серебра и алюминия практически равны. При постоянном токе и определённых параметрах контура КЗ может происходить вторичный тепловой пробой, проявляющийся в повышении тока через предохранитель после 40-100 мс от момента достижения нулевого значения. В этом случае цепь отключается другим защитным аппаратом. Энергия, рассеиваемая в предохранителе до пробоя, на 20-40 % ниже, чем при коммутации переменного тока.

Возникновение вторичного пробоя в предохранителях с вставками из алюминия объясняется образованием оксида алюминия, который под действием постоянного приложенного напряжения и высокой температуры сохраняет достаточно высокую электропроводность. При этом, скорость нагрева предохранителя от протекания остаточного тока выше, чем скорость охлаждения, обусловленная теплопроводностью оксида алюминия. В связи с этим, для применения алюминиевых плавких вставок на постоянном токе необходимо дополнительное увеличение их длины на 15-20 % или снижение рабочего напряжения, примерно, на такое же значение. Активное

взаимодействие алюминия с наполнителем на постоянном токе может стать причиной и того, что габаритным размерам предохранителя, например, на номинальный ток 400 А с серебрянными плавкими вставками будут соответствовать габаритные размеры предохранителя на 300 А с плавкими вставками из алюминия.

Плавкие вставки из алюминия обладают высокой чувствительностью к любому виду циклических воздействий. Так, быстродействующие предохранители на  $I_{НОМ}=400$  А с алюминиевыми плавкими вставками обеспечивают нормальную работу в длительном режиме, но не выдерживают циклическую нагрузку на тот же номинальный ток согласно рекомендациям МЭК 269-4 (18 мин под током, 18 мин пауза), расплавляясь через 89-127 таких циклов. Предохранители на  $I_{НОМ}=800$  А выдерживали всего лишь 52-55 таких циклов, хотя падение напряжения и превышения температуры выводов в нормальном режиме были в допустимых пределах. При испытании на старение (8 ч под постоянной нагрузкой номинальным током, 16 ч бестоковая пауза) и предохранители с плавкими вставками из алюминия выдерживали лишь 31-33 цикла (около 260 ч), что значительно меньше аналогичных показателей у предохранителей с серебрянными плавкими вставками. Вместе с тем, предохранители типа ПП 31, в которых плотность номинального тока в алюминиевых плавких вставках в 6-8 раз меньше, чем в быстродействующих предохранителях, надёжно выдержали трёхлетние испытания в режиме старения. Таким образом, если два предохранителя с плавкими вставками из серебра и алюминия имеют один и тот же номинальный ток по параметрам стационарного режима (превышение температуры на выводах и потери мощности у них одинаковы), то их циклическая стойкость (в часах работы в заданном режиме) будет одинаковой в том случае, если ток предохранителя с плавкими вставками из алюминия будет снижен на 10-20 %.

Другой особенностью алюминия, как материала плавкой вставки, является сложность отключения предохранителем малых аварийных токов



(2,3÷3,5)  $I_{НОМ}$ . Это обусловлено тем, что в течение некоторого времени тугоплавкая оксидная оболочка препятствует полному расплавлению и испарению перешейков. Количество теплоты, выделяемой при прохождении таких малых токов, недостаточно для быстрого разрушения оболочки.

**Медь** – перспективный материал для замены серебра в плавких вставках предохранителей. Мировая добыча меди ежегодно превышает 10 млн.т., т.е. на три порядка выше добычи серебра. Медь дешевле серебра, по меньшей мере, в 300 раз и близка к нему по своим электрофизическим свойствам. Удельное электрическое сопротивление меди на 5-6 % выше, чем у серебра, что легко компенсируется увеличением сечения плавких вставок. Температурные коэффициенты меди и серебра довольно близки и в диапазоне температур 0-100<sup>0</sup>С равны соответственно 17 и  $19 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Модуль упругости меди в 1,3 раза выше, чем у серебра, что неблагоприятно для циклического режима работы предохранителя. Теплопроводность меди, примерно, на 6 % меньше, чем у серебра, а температура плавления более чем на 120<sup>0</sup>С выше.

Медь не является химически активным элементом, а скорость её коррозии при нормальной температуре мала. Антикоррозионные свойства меди в значительной степени определяются прочностью защитной оксидной плёнки, замедляющей дальнейшее разрушение металла при воздействии коррозии. При химической реакции  $2\text{Cu} + \text{O}_2 = 2\text{CuO}$  или  $2\text{Cu} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{Cu}_2\text{O}$  для полного окисления 1г меди необходимо 0,17 л кислорода. При этом выделяется энергия, равная 168 кДж/моль, что значительно меньше, чем для алюминия, но гораздо больше, чем для серебра. Масса плавких вставок предохранителей ПП57, ПП59, ПП60 составляет 10-30 грамм и содержит не более 1-2 % кислорода, необходимого для окисления плавкой вставки. Тем не менее, необходимо учитывать опасность коррозии перешейков в таких предохранителях.

Циклическая стойкость меди в вакууме на порядок выше, чем в воздушной среде (у золота такого рода различия не обнаружено).

Оксидные плёнки меди обладают достаточной электропроводностью и поэтому не влияют на физические условия работы плавкой вставки, если они образуются во время эксплуатации и имеют хорошую адгезию с его поверхностью. Обычно электротехническая медь перенасыщена кислородом в твёрдорастворённом состоянии, и оксидная плёнка на её поверхности не обладает хорошей адгезией.

Медь и серебро имеют подобную структуру и образуют эвтектики с оловом, имеющие практически одинаковые температуры плавления 200-230<sup>0</sup>С, близкие к точке плавления олова.

Медные плавкие вставки целесообразно исследовать при условии обеспечения надёжной защиты их поверхности от воздействия окружающей среды, сохранения целостности оксидной плёнки и оптимального выбора номинального режима предохранителя. Надёжная защита поверхности медной плавкой вставки достигается путём нанесения покрытия, например, из никеля или металла, имеющего прочную оксидную плёнку, например, алюминия. Эффективно использование так называемого твёрдого наполнителя, сформированного посредством пропитки кварцевого песка жидким связующее вещество с последующим прокаливанием. Образовавшаяся при этом твёрдая структура обеспечивает надёжную защиту поверхности вставки. Для сохранения целостности оксидной плёнки медной вставки эффективно использование изогнутых плавких вставок.

Повышенное по сравнению с серебром удельное электрическое сопротивление меди требует увеличения на 6-8 % суммарного сечения плавких вставок для обеспечения заданного теплового режима. Однако более высокое значение константы Мейера [7] у меди ( $112 \cdot 10^3 \text{ A}^2\text{c}/\text{мм}^4$ ) по сравнению с серебром ( $80 \cdot 10^3 \text{ A}^2\text{c}/\text{мм}^4$ ) предполагает уменьшение поперечного сечения медных вставок на 10-12 % по сравнению с серебряными на тот же номинальный ток для удовлетворения требований к защитным характеристикам. Это теоретическое противоречие обусловлено тем, что при

высокой температуре удельное электрическое сопротивление меди растёт медленней, чем у серебра. В связи с этим для получения заданного теплового режима при медных плавких вставках требуется небольшое (2-5 %) увеличение их сечения. В этом случае превышение температуры выводов и потери мощности в предохранителе получаются такими же, как и при серебряных плавких вставках.

Некоторое увеличение массы медной плавкой вставки практически не осложняет деионизацию и охлаждение паров металла, поскольку более высокий потенциал ионизации меди, равный 7,77 В (у серебра 7,57 В), и большее катодное падение напряжения, равное 14,7-15,4 В (у серебра 12,1-13,68В), способствует улучшению гашения дуги.

Механические напряжения, возникающие при циклических нагрузках, дополнительно препятствуют адгезии оксидной плёнки к меди, способствуя её растрескиванию и отслоению, что облегчает развитие коррозии. При эквивалентном тепловом режиме циклическая стойкость медных плавких вставок по номинальному току, примерно, на 10 % меньше, чем серебряных.

**Наполнители современных предохранителей.** В первом патенте на предохранитель (1890 г.) описан элемент в виде медной тонкой фольги или проволоки, помещённых в корпус из изоляционного материала. Корпус заполнялся мелкозернистым непроводящим материалом: мелом, кварцевым песком, мрамором, кирпичным порошком, асбестом, корундом. Многолетний опыт использования кварцевого песка в качестве наполнителя подтвердил его высокую эффективность. Применение методов вибрационной технологии засыпки кварцевого песка в предохранитель относится к периоду 50-х годов XX века, и было вызвано требованием существенного повышения защитных характеристик предохранителей, которые начали использоваться в силовых полупроводниковых установках.

Основные функции наполнителя:

- воздействие на ампер-секундную характеристику путём отвода тепла от плавкой вставки в длительном режиме работы и за счёт этого повышение

номинального тока по сравнению с током предохранителей без наполнителя;

- увеличение преддугового джоулева интеграла благодаря улучшению теплопередачи от перешейков;
- отбор энергии дуги в результате плавления и испарения наполнителя, что обеспечивает быстрое спадание тока до нуля и уменьшению габаритных размеров предохранителя;
- формирование фульгуритных трубок, содержащих дугу внутри твёрдой структуры наполнителя, что в определённых пределах предотвращает слияние дуг и пробой между элементами;
- содействие гашению дуги с помощью давления, образованного внутри фульгуритной трубки;
- ослабление механических и термических воздействий на корпус предохранителя благодаря наличию нерасплавленного наполнителя. Тепловой удар, который может вызвать растрескивание корпуса, ослабляется благодаря высокому отношению теплового сопротивления наполнителя к его теплоёмкости и достигает корпуса уже после погасания дуги;
- демпфирование переходного восстанавливающегося напряжения в защищаемой цепи благодаря повышенной электропроводности наполнителя;
- демпфирование и защита плавких вставок от механических повреждений, ослабление климатических воздействий, сохранение внутри корпуса тепла и пламени дуги при срабатывании.

Доминирующей функцией наполнителя является обеспечение надёжности гашения дуги.

Наполнитель – кварцевый песок должен быть чистым, однородным по цвету, влажность его перед засыпкой должна быть не более 0,005 %. Зерновой и химический состав его должен соответствовать:

1. Размер зёрен, мм	Содержание, %
От 0,02 до 0,1 .....	Не более 1,5
От 0,1 до 0,63 .....	Не менее 98
Глинистая составляющая .....	Не более 0,5
2. Химический состав	Содержание, %
Оксид кремния $\text{SiO}_2$ .....	Не менее 98
Оксид железа $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .....	Не менее 0,18
Оксид алюминия плюс диоксид титана $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ .....	0,15
Примеси .....	Не более 0,92

Наполнитель в предохранителях обычно представляет собой зернистый материал, состоящий из дискретных соприкасающихся друг с другом сравнительно твёрдых зёрен и пустот между ними. Зёрна могут перемещаться относительно друг друга, пустоты обычно заполнены воздухом.

Плотность наполнителя существенно влияет на характеристики предохранителя во время дугогашения. Так, снижение объёмной плотности наполнителя на 3-10 %, например, путём использования свободной ручной засыпки наполнителя, приводит к снижению среднего значения напряжения на дуге на 6-15%, увеличению пропускаемого тока на 8-15%, преддугового джоулева интеграла на 15-30%, джоулева интеграла отключения более чем на 30% и энергии дуги более чем на 40 %. При уменьшении содержания кварцевого песка на 10-20 % джоулевы интегралы и энергия дуги увеличиваются в 3-5 раз, что, как правило, приводит к взрыву предохранителя.

Пути совершенствования наполнителей – введение к ним специальных добавок: мела ( $\text{CaCO}_3$ ), трёхводного гидрата глинозёма ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ); связующих веществ - смолы: эпоксидные, фенольные и полиуретановые синтетические смолы; коллоидальные суспензии оксида кремния, оксида магния, оксида алюминия в воде, в этиловом спирте, ацетоне. Наибольшее распространение на практике в качестве неорганического связующего вещества получило техническое жидкое стекло ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). В техническом

жидком стекле содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  составляет 10-12%, а содержание  $\text{SiO}_2$  колеблется в пределах 32-34%.

При рациональном выборе геометрии плавкой вставки и степени уплотнения наполнителя обеспечивается возможность многократного повышения циклической стойкости предохранителя, улучшения тех или иных защитных характеристик.

**Перспективы развития быстродействующих предохранителей.** В развитии быстродействующих плавких предохранителей будет преобладать тенденция усложнения возлагаемых на них функций при сложных аварийных ситуациях. Так, если раньше предохранители включались последовательно с защищаемым полупроводниковым прибором, то в настоящее время предохранители включаются также в фазы переменного тока и в нагрузки. Можно полагать, что быстродействующие плавкие предохранители сохранят своё значение как аппараты защиты, отличающиеся простотой конструкции и низкой стоимостью. Подобно силовым полупроводниковым приборам, быстродействующие предохранители будут развиваться в направлении увеличения номинальных параметров и единичной мощности. В связи с этим широкое распространение должны получить, так называемые, таблеточные предохранители с принудительным охлаждением на номинальные токи до 2,5-3,5 кА и номинальное напряжение до 1,5 кВ в одном модуле. Применение таблеточных предохранителей позволяет значительно снизить габариты преобразовательных агрегатов и упростить схему их управления.

Для преобразовательных агрегатов малой мощности с одним полупроводниковым вентилем в каждой полуфазе актуальна разработка предохранителей для индивидуальной защиты таких вентиляей.

Исключительно важно комплексное совершенствование технологии производства предохранителей с одновременным решением проблем повышения производительности труда и точности отдельных операций: использование прогрессивных безотходных технологий и автоматизация

производства; экономия сырья и замена дефицитных материалов при постоянном улучшении эксплуатационных характеристик предохранителей.

Стремление к экономии ресурсов диктует необходимость создания универсальных предохранителей, применяемых для преобразовательных агрегатов самых различных серий. В такой ситуации важное значение приобретает согласованность технической политики между разработчиками вентилей, аппаратов защиты и преобразовательных агрегатов.

### 3. Изоляторы

Изоляторы являются неотъемлемой частью высоковольтных и низковольтных аппаратов, распределительных и трансформаторных подстанций и служат для электрической изоляции и механического крепления частей электрических устройств, находящихся под разными потенциалами.

По условиям эксплуатации изоляторы подразделяются на конструкции для работы в помещении (для внутренней установки) и для работы в открытой атмосфере (для наружной установки).

Изоляторы для внутренней установки изготавливают в климатическом исполнении для районов умеренного (У), холодного (ХЛ) и тропического (Т) климата категорий размещения 2 и 3 по ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70, а изоляторы для наружной установки – для районов У и ХЛ категории размещения 1.

По назначению изоляторы подразделяются на опорные, проходные и линейные. Каждый тип изолятора имеет разновидности, отличающиеся по конструктивному исполнению, техническим характеристикам и условиям эксплуатации. Для каждого класса напряжения однотипные изоляторы изготавливают на различные механические нагрузки. Классификация изоляторов приведена в табл.5.

Таблица 5

Классификация изоляторов

По назначению	По конструктивному исполнению		
	для внутренней установки	для наружной установки	для наружно-внутренней установки
Опорные	1.С наружной заделкой арматуры. 2.С внутренней заделкой арматуры. 3.С комбинированной заделкой арматуры.	1.Опорно-штыревые.	-
Проходные	Для работы в помещении.		
Линейные	-		1.Штыревые 2.Тарельчатые 3.Стержневые

По месту установки изоляторы подразделяются на стационарные, линейные и аппаратные. Стационарные изоляторы служат для крепления и изоляции шин в закрытых и открытых распределительных устройствах электрических станций и подстанций. Для этой же цели применяют опорные и проходные изоляторы. Линейные изоляторы, в качестве которых используют подвесные и штыревые, служат для крепления проводов ВЛ и шин открытых распределительных устройств. Аппаратные изоляторы, служащие для крепления токоведущих частей аппаратов, применяются различной конструкции: опорные, проходные, в виде стержней, тяг, втулок и т.д.

Различают изоляторы низкого (до 660 В включительно) и высокого (выше 660 В) напряжения. Изоляторы высокого напряжения выполняют на 1,3,6,10, 20,35,110,150,220,330,500,750 и 1150 кВ.

Изоляторы должны отвечать ряду требований, определяющих их электрические и механические характеристики, в соответствии с назначением и номинальным напряжением, а также загрязнённостью окружающей среды.

К электрическим характеристикам изоляторов относятся: номинальное напряжение, пробивное напряжение, разрядные и выдерживаемые напряжения промышленной частоты в сухом состоянии и под дождём, импульсные 50%-ные разрядные напряжения обеих полярностей.



Значения испытательных выдерживаемых напряжений промышленной частоты и импульсных приведены в ГОСТ 1516.1-76.

Наименьшее пробивное напряжение изолятора  $U_{пр}$  при промышленной частоте и плавном подъёме должно превышать выдерживаемое напряжение внешней изоляции в сухом состоянии не менее чем в 1,6 раза для изоляторов с основной твёрдой изоляцией, не менее чем в 1,3 раза – для изоляторов с основной полужидкой и пластичной изоляцией (компауднонаполненные) и не менее чем в 1,2 раза – для изоляторов с основной жидкой или бумажно-масляной изоляцией.

Основной механической характеристикой является минимальная разрушающая нагрузка,  $H$ , приложенная к головке изолятора в направлении, перпендикулярном оси, а также жёсткость, или отношение силы, приложенной к головке изолятора в направлении, перпендикулярном оси, к отклонению головки от вертикали,  $H/мм$ . Жёсткость опорных изоляторов зависит от их конструкции и номинального напряжения. Изоляторы для напряжения до 35 кВ включительно обладают очень большой жёсткостью, поскольку высота их относительно мала. Изоляторы для более высоких напряжений имеют большую высоту и меньшую жёсткость. Она составляет в зависимости от конструкции от 300 до 2000  $H/мм$  для изоляторов.

**Опорные изоляторы** для внутренней установки выпускают согласно ГОСТ 15131-77 и ГОСТ 19797-80 на номинальные напряжения 6,10,20 и 35 кВ. В процессе эксплуатации опорные изоляторы подвергаются воздействию изгибающих нагрузок, обусловленных электродинамическими силами при КЗ, которые создают усилия, нормальные к оси изолятора. В некоторых случаях изоляторы испытывают усилия на растяжение, сжатие или кручение. Механическая прочность этих изоляторов, определяемая значениями минимального разрушающего усилия на изгиб (разрыв), соответствует следующим значениям: 375, 750, 1250, 2000, 3000, 4250 и 6000 даН (1 даН=10 Н).

Для обеспечения электрической изоляции и механической связи разнопотенциальных частей открытых звеньев электротехнических устройств в метрополитенах наибольшее распространение получили следующие типы конструкций опорных изоляторов.

Изоляционная деталь изолятора с наружной заделкой арматуры (рис.8) представляет собой полое тело вращения, армированное верхней и нижней арматурой. Форма верхней арматуры (колпачок изолятора) круглая. На торцевой

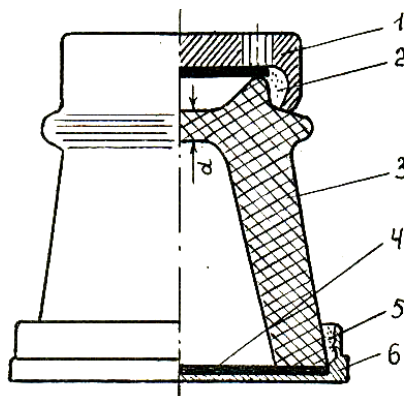


Рис.8. Опорный изолятор с наружной заделкой арматуры:  
1 – армированный верхний колпачок; 2,5 – цементно-песчаная  
связка; 3- фарфоровое тело; 4 – прокладка; 6 – основание

поверхности колпачка предусмотрены резьбовые отверстия для крепления токоведущих шин или деталей электрических аппаратов. Нижняя арматура (основание) изолятора, с помощью которой осуществляется его крепление, может быть круглой, овальной или квадратной формы. Для компенсации различных значений температурных коэффициентов линейного расширения металлической арматуры и фарфора, а также для получения строительной высоты изолятора в пределах нормированных допусков внутрь металлической арматуры закладываются прокладки.

Армируемые поверхности деталей изолятора покрываются равномерным слоем компенсирующей битумной промазки толщиной не менее 0,1 мм. На арматуру изолятора и швы цементных связей наносят влагостойкое покрытие.

На внешней стороне изолятора предусмотрены слабо развитые рёбра: одно на напряжение - 6-10 кВ, два – на 20 кВ, три – на 35 кВ, которые

способствуют незначительному повышению напряжения перекрытия при импульсах и при частоте 50Гц. Наибольшее повышение напряжения перекрытия происходит при расположении ребра около колпачка изолятора.

Такая конструкция изолятора имеет недостатки: наличие внутренних полостей, способствующих проникновению внутрь изолятора влаги и загрязнения, в результате чего возникают внутренние разряды, дополнительные потери энергии, радиопомехи, а также процессы разрушения конструкции. Устранение недостатков конструкции изолятора с наружной заделкой арматуры привело к разработке изолятора с внутренней заделкой арматуры (рис.9).

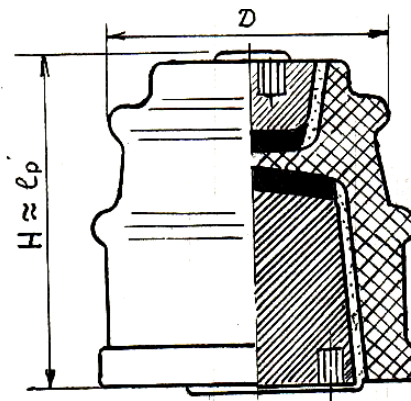


Рис.9. Опорный изолятор с внутренней заделкой арматуры

Конструкция изолятора с внутренней заделкой арматуры отличается меньшей высотой и материалоёмкостью. Однако изготовить такой изолятор на большие механические нагрузки затруднительно. Эта конструкция изолятора по сравнению с первой обладает рядом преимуществ. Отсутствие воздушных полостей в теле изолятора устраняет возникновение внутренних разрядов. Длина разрядного промежутка изолятора  $l_p$  практически совпадает со строительной высотой изолятора  $H$ , что позволяет уменьшить последнюю на 35-45 % по сравнению со строительной высотой изолятора с наружной заделкой арматуры на тот же класс напряжения.

Перспективной является конструкция изолятора с комбинированной заделкой арматуры, в которой верхняя арматура имеет внутреннюю заделку, а нижняя – наружную (рис.10).

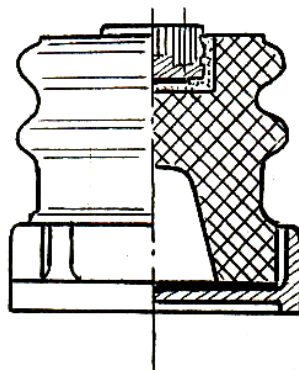


Рис.10. Опорный изолятор с комбинированной заделкой арматуры

Опорные изоляторы с внутренней и комбинированной заделкой арматуры изготавливаются и с ребристой боковой поверхностью (рис.11). Такие изоляторы отличаются большой длиной пути утечки и находят широкое распространение для монтажа электрооборудования в условиях повышенной влажности окружающей среды.

Срок службы опорных изоляторов не менее 20 лет при интенсивности отказов не более  $6 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ .

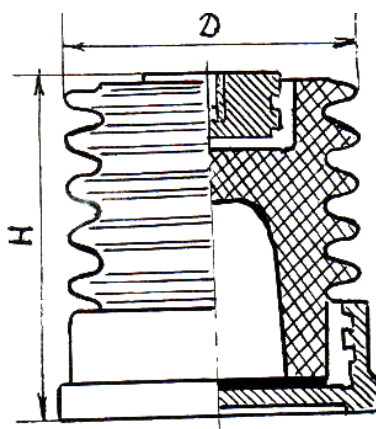


Рис.11. Опорный изолятор с ребристой поверхностью и комбинированной заделкой арматуры

**Проходные изоляторы** для внутренней установки предназначены для проведения изоляции токоведущих частей закрытых РУ электрических станций и подстанций, комплектных устройств и трансформаторных подстанций. В процессе эксплуатации на проходные изоляторы воздействуют электрические,

тепловые и механические нагрузки от токов КЗ, длительного прохождения номинального электрического тока. В трансформаторах тока проходные фарфоровые изоляторы применяются для изоляции вторичной обмотки от первичной, расположенной во внутренней полости изолятора.

Проходные армированные фарфоровые изоляторы для работы в помещении выпускают по ГОСТ 22229-76Е (общие технические условия) и ГОСТ 20454-79 (основные параметры и размеры) на номинальные напряжения 6, 10, 20 и 35 кВ, частоты 50 и 60 Гц и номинальные токи 400, 630, 1000, 1600, 2000, 3200, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 16000, 20000 и 25000 А с минимальной разрушающей нагрузкой на изгиб 375, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000 и 4250 даН.

Проходные изоляторы для внутренней установки до 35 кВ включительно (рис.12) имеют полый фарфоровый корпус без наполнителя с небольшими рёбрами. Для крепления изолятора в стене предусмотрен фланец, а для крепления проводника – металлические колпаки. Длина фарфорового корпуса определяется номинальным напряжением, а диаметр внутренней полости – сечением токо-

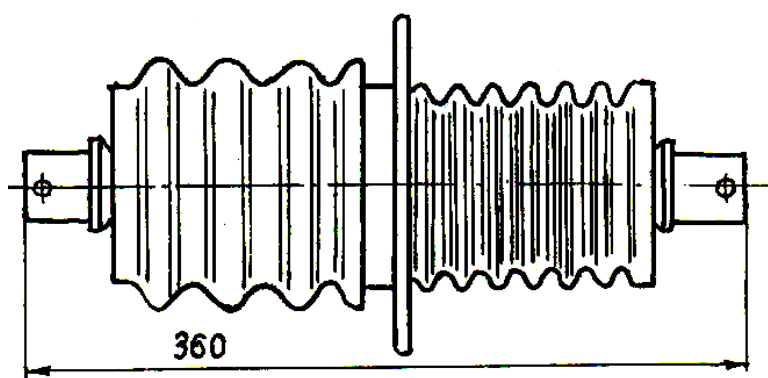


Рис.12.Проходной изолятор для РУ 10 кВ

ведущих стержней, следовательно, номинальным током. Изоляторы на номинальные токи 2000 А и выше с разрушающей нагрузкой 2000 даН и более изготавливают без токоведущих частей. Размеры внутренней полости выбраны здесь достаточными, чтобы пропустить через изолятор шину или пакет шин

прямоугольного сечения, а при очень большом токе – трубу круглого сечения. Фланцы и колпаки, в особенности у изоляторов с большим номинальным током, изготавливают из немагнитных материалов во избежание дополнительных потерь мощности от индуктированных токов. У изоляторов, предназначенных для ввода жёстких и гибких шин в здание РУ или шкафы КРУН, часть фарфорового корпуса, обращённая наружу, имеет развитие ребра для увеличения разрядного напряжения под дождём.

При выборе изоляторов должны учитываться минимальные разрушающие усилия и моменты с соответствующими коэффициентами запаса, учитывающими статические и динамические нагрузки в эксплуатации. Изоляторы для аппаратов высокого напряжения выбирают из существующих типов, исходя из требований обеспечения наружной работы: при длительном воздействии рабочего напряжения; при воздействии грозových и коммутационных перенапряжений; при эксплуатационных воздействиях механических нагрузок.

**Материалы, применяемые для изготовления изоляторов.** Наиболее широкое применение для изготовления изоляторов получил специальный керамический материал – электротехнический фарфор. Он представляет собой твёрдое вещество, как правило, белого цвета, которое получается при термической обработке исходных керамических масс. Исходная фарфоровая масса состоит из пластичных глинистых материалов (каолин – 45-50 %), отощающих материалов (кварц – 15-25 %, фарфоровый бой – до 8 %), плавней (полевой шпат 30-35%). Глинистые материалы смешивают с водой, а отощающие и плавни предварительно измельчают (диаметр частиц меньше 0,06 мм). Глинистые вещества придают фарфоровой массе пластичность, а отощающие материалы снижают усадку, деформацию и растрескивание глинистых материалов при термической обработке. Плавни снижают температуру обжига изделия. В некоторых электрокерамических материалах глинистые вещества заменяют вводимые в них низкомолекулярные смолы, парафин, декстрин и др.

При термической обработке ( $1300-1450^{\circ}\text{C}$ ) электрокерамики между частицами исходных материалов происходят сложные физико-механические процессы с образованием новых веществ кристаллического и стеклообразного строения. Кристаллические вещества (муллит, корунд и др.) обеспечивают механическую прочность фарфора и малый температурный коэффициент линейного расширения. Стекло, образовавшееся в результате плавления частиц полевого шпата и кварца, придаёт фарфору хорошую электрическую прочность и негигроскопичность. Для улучшения электрических и механических характеристик изделий из электротехнического фарфора их покрывают белой или коричневой глазурью. При обжиге фарфоровых изделий глазурь расплавляется и прочно соединяется с их поверхностью. Глазурное покрытие образует тонкий стекловидный слой, благодаря которому снижается загрязняемость изделий в процессе эксплуатации и облегчается их очистка, что повышает электрические характеристики. Другое, не менее важное назначение глазури состоит в повышении на 15-20 % механических характеристик фарфора.

Повысить электрические и механические свойства фарфора можно также за счёт введения в исходную массу глинозёма ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  от 30 до 50 % и более) при уменьшении количества полевого шпата. При этом в структуре фарфора появляются кристаллы корунда, что обеспечивает более высокую электрическую и механическую прочность.

Полную классификацию керамических электротехнических материалов приводит ГОСТ 20419-83.

Одним из прогрессивных направлений в электроаппаратостроении является создание изоляторов и изоляционных конструкций на основе литой изоляции. Использование литой изоляции позволяет делать аппараты высокого напряжения более простыми, уменьшать размеры и массу, снижать их трудоёмкость и стоимость. Наибольшее распространение получила литая изоляция на основе эпоксидных смол.

#### 4. Шиноприводы и кабельные линии

Для выполнения электрических сетей напряжением до 1 кВ и выше применяются голые и изолированные провода, кабели и токопроводы. Материалом для токоведущих частей служат: медь, алюминий, алюминиевые сплавы и сталь. Широкое распространение алюминия в качестве проводникового материала объясняется целым рядом положительных свойств, таких, как высокая электро- и теплопроводность, низкая плотность, достаточная стойкость к атмосферным и химическим воздействиям, лёгкая механическая срабатываемость, хорошая свариваемость. В то же время алюминиевые проводники имеют малую устойчивость при вибрации, относительно невелика надёжность болтовых соединений без применения специальных мер.

**Токопроводы** – устройства, предназначенные для передачи и распределения электроэнергии, и состоящие из неизолированных или изолированных проводников и относящихся к ним изоляторов, защитных оболочек, ответвительных устройств, поддерживающих и опорных конструкций.

Токопроводы напряжением 6-20 кВ получили распространение на электростанциях для соединения генераторов с трансформаторами и с РУ. На промышленных предприятиях при передаче больших мощностей (15-20 МВ·А при напряжении 6 кВ; 25-35 МВ·А при напряжении 10 кВ; 35 МВ·А при напряжении 35 кВ) согласно ПУЭ следует отдавать предпочтение гибким или жёстким токопроводам вместо большого числа параллельно идущих кабелей. Токопроводы напряжением 110 кВ широко применяются в качестве вставок в воздушных ЛЭП, что облегчает выполнение пересечений.

По способу защиты от прикосновения к токоведущим частям и от воздействия окружающей среды различают открытое и закрытое, пыленепроницаемое, брызгозащищённое исполнение токопроводов. В



зависимости от вида проводников токопроводы подразделяются на гибкие (при использовании проводов) и жёсткие (при использовании жёстких шин).

**Шины** – это неизолированные проводники или система проводников, укреплённых с помощью изоляторов и предназначенных для электрической связи между элементами электроустановки.

В высоковольтных РУ шины используют для соединения электрических аппаратов, параллельного соединения ряда элементов (сборные шины) и для присоединения КРУ генераторов, трансформаторов и т.д. В токопроводах высокого напряжения чаще всего применяют открытые неизолированные шины из алюминия или алюминиевых сплавов повышенной прочности с плоским, коробчатым или трубчатым сечением (рис.13). В цепях с большими рабочими токами применяют многополосные шины, набранные в пакеты с прокладками, равными толщине полосы.

В сетях промышленных предприятий напряжением 6-35 кВ наиболее широкое распространение получили жёсткие магистральные токопроводы с расположением шин в вертикальной плоскости и с шинами, расположенными по вершинам равностороннего треугольника (рис.13). Эти конструкции могут быть выполнены как на опорных, так и на подвесных изоляторах.

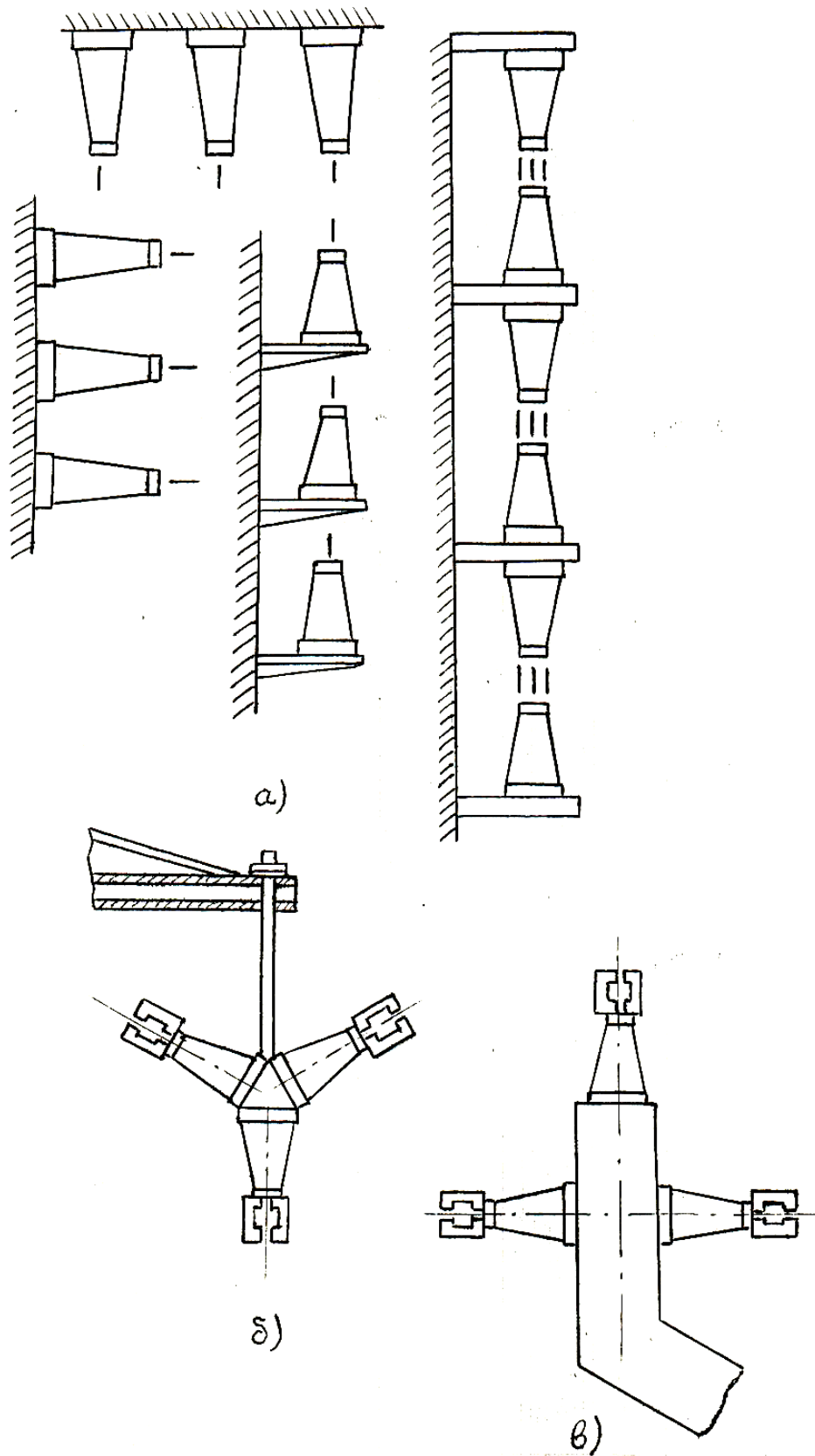


Рис.13. Примеры токопроводов высокого напряжения:  
 а – с плоским расположением шин; б – подвесной;  
 в – опорный с треугольным расположением шин

Токопроводы высокого напряжения прокладывают на открытом воздухе (подвешивают на опорах, расставляемых обычно с пролётами длиной 6-12 м) или в шинных галереях, коридорах и туннелях (подвешиванием к потолку или консолям, креплением к опорным изоляторам, установленным на стенах, консолях и т.п.). Если шины расположены на высоте, на которой не исключена возможность случайного прикосновения к ним (например, на высоте менее 2,5 м при напряжении до 10 кВ), то со стороны коридора обслуживания предусматривают сплошные, сетчатые или перфорированные ограждения. Ответвления от токопроводов высокого напряжения существенно снижают их надёжность, и поэтому их применение относительно редко.

Когда открытая конструкция токопровода высокого напряжения (ВН) не обеспечивает достаточной защиты от воздействия окружающей среды, или когда она по требуемым расстояниям до строительных конструкций, земли, зон обслуживания, проходов неприемлема, применяют:

- защищённые шинопроводы, в которых неизолированные шины ограждены от случайного прикосновения и попадания на них посторонних предметов сеткой, перфорированным коробом и т.п.;
- закрытые шинопроводы с неизолированными шинами, вмонтированными в сплошной короб брызгозащищённого или пыленепроницаемого исполнения;
- шинопроводы с изолированными шинами и герметической металлической оболочкой.

Короба и оболочки могут быть общими для всего шинопровода или отдельными для каждой шины.

При колебаниях температуры в жёстко закреплённых токопроводах (особенно в случае наружной установки) возникают механические напряжения, которые из-за большого сечения токопровода могут вызывать существенные механические усилия, действующие на опорные изоляторы и другие опорные конструкции, а также на сами шины. В случае абсолютно жёсткого закрепления

и неизменности расстояний между местами закрепления механическое напряжение в шине при повышении её температуры определяется формулой

$$\sigma = E\lambda \Delta\vartheta, \quad (1)$$

где  $\sigma$  - напряжение сжатия, Па;  $E$  – модуль упругости материала шины, Па;  $\lambda$  - температурный коэффициент удлинения, 1/К;  $\Delta\vartheta$  - повышение температуры шины, К.

Усилие, с которым шина при изменении температуры действует на опорные конструкции, определяется по формуле

$$F = \sigma S, \quad (2)$$

где  $F$  - усилие, Н;  $S$  – сечение шины, м<sup>2</sup>.

Для предотвращения разрушения изоляторов и деформации шин и их опорных конструкций в токопроводах предусматривают:

- крепление к изоляторам, допускающее проскальзывание шин при их тепловом удлинении или сокращении;
- компенсаторы тепловых деформаций, расставленные через определённые расстояния по длине токопровода (например, через каждые 50 м) в виде гибких вставок;
- гибкое присоединение к электрическим аппаратам в конце шинопровода.

На шины токопроводов переменного тока действуют периодические электромеханические усилия частотой  $2f$  ( $f$  – частота переменного тока). При совпадении этой частоты с частотой собственных колебаний жёстких шин возникают нежелательные механические резонансные явления. Частота собственных колебаний шин в случае равных расстояний между опорными изоляторами по всей длине шинопровода определяется по формуле

$$f_0 = \frac{3,56}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (3)$$

где  $l$  – пролёт шины, м;  $E$  – модуль упругости материала шины, (табл.6), Па;  $J$  – момент инерции поперечного сечения шины относительно оси сечения,

перпендикулярной плоскости колебаний,  $m^4$ ;  $m$  – масса шины на единицу длины, кг/м.

Наиболее существенные резонансные явления (особенно при КЗ) имеют место при  $f_0 = (1,75...2,5)f$ . При частоте сети 50 Гц опасным диапазоном частот собственных колебаний шин можно, следовательно, считать 88...125 Гц.

Таблица 6

## Механические характеристики материала шин

Материал шины	Марка	Разрушающее напряжение, МПа	Допустимое напряжение, МПа	Модуль упругости, Гпа
Алюминий	АО, А1, АДО	120 60-70	85 42-50	70 -
Алюминиевый сплав	АДЗ1Т АДЗ1Т1	130 200	90 140	- -
Медь	МГМ МГТ	250-260 250-300	175-180 175-210	100 100

В трёхфазных шинопроводах с расположением шин в одной плоскости необходимо считаться с неодинаковой индуктивностью фаз (индуктивные сопротивления крайних фаз на 15 % больше, чем у средней фазы) и применять транспозицию шин через определённые расстояния. В токопроводах 6 или 10кВ транспозиция шин обычно предусматривается при длине токопровода более 0,5км.

Основные достоинства токопровода высокого напряжения по сравнению с кабельными линиями (при больших передаваемых мощностях) – меньшая стоимость проводников и изоляции, а также строительной части, особенно в случае открытых подвесных токопроводов. Один токопровод напряжением 10кВ с трубчатыми шинами с сечением одной фазы 1900...7500 мм<sup>2</sup> (с длительно допустимым током 2280...7520 А) может заменить соответственно 9...28 параллельных кабелей сечением 3×240 мм<sup>2</sup>.

Жёсткий токопровод до 1 кВ заводского изготовления называется **шинопроводом**.

**Трёхфазные шинопроводы напряжением до 1 кВ.** В зависимости от назначения шинопроводы подразделяются на:

- магистральные (ШМА для переменного тока и ШМАД для постоянного), предназначенные, в основном, для присоединения к ним распределительных шинопроводов и силовых распределительных пунктов, щитов и отдельных мощных электроприёмников;
- распределительные (ШРА и ШРМ, где буква М означает медные шины), предназначенные, в основном, для присоединения к ним электроприёмников;
- троллейные (ШТА и ШТМ), предназначенные для питания передвижных электроприёмников;
- осветительные (ШОС), предназначенные для питания светильников и электроприёмников небольшой мощности.

В сетях до 1 кВ различают закрытые, защищённые и открытые шинопроводы. Закрытые шинопроводы комплектуются из элементов, изготавливаемых на заводах. Их применение в 4-5 раз уменьшает время монтажа, они могут прокладываться на небольшой высоте, в непосредственной близости от любых коммуникаций и установок, безопасных в обслуживании.

Шинопроводы в сетях низкого напряжения (НН) комплектуются из типовых секций различного назначения: прямых, угловых, тройниковых, компенсационных, подгоночных, ответвительных, гибких, секционных, переходных, присоединительных. Прямые секции имеют длину 3-5 м. Ответвления от секций (рис.14) осуществляются следующим образом:

- от ответвительных вставок между секциями;
- от мест, предусмотренных для болтового или штепсельного присоединения отходящих линий и находящихся обычно друг от друга на расстоянии 0,4...0,6 м; в начале отходящих линий может

предусматриваться прикрепляемая к шинопроводу коробка с защитными аппаратами;

- по всей длине шинопровода при помощи неподвижных или скользящих контактных узлов (щелевые и троллейные шинопроводы).

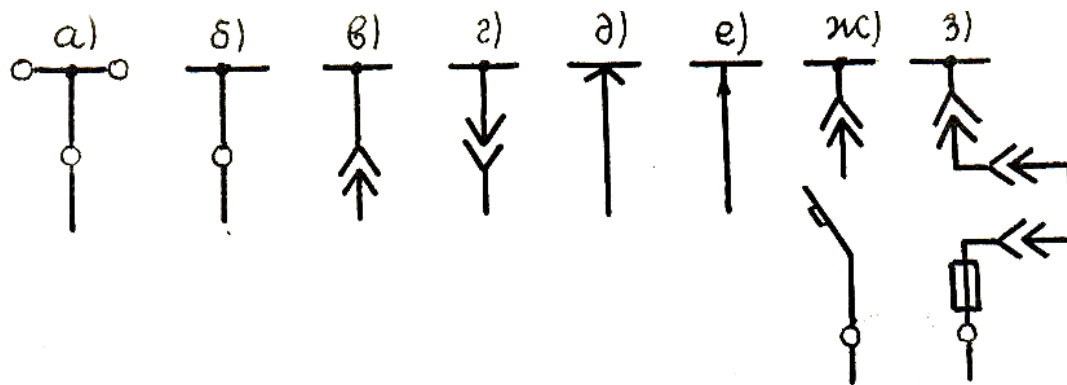


Рис.14.Схемы ответвлений от шинопроводов НН: а – применение ответвлённой вставки; б – разборное (болтовое) соединение; в-д – разъёмные (штепсельные) соединения; е – скользящее соединение; ж – пример применения ответвительной коробки с автоматическим выключателем; з – пример применения ответвительной коробки с плавкими предохранителями и блокировочными разъёмами, снимающими напряжение с предохранителей при открывании крышки ящика

Шинопроводы с большим номинальным током (более 1 кА), ответвления от которых осуществляют, в основном, при помощи соответствующих вставок, называют магистральными. Магистральные шинопроводы имеют малое количество ответвлений. От них могут ответвляться шинопроводы с меньшим номинальным током (обычно 60...600 А), имеющие большое число ответвлений (распределительные шинопроводы).

В шинопроводах НН чаще всего применяют плоские алюминиевые шины. Контактные поверхности шин при необходимости могут быть покрыты медью, серебром или сложными многослойными гальваническими покрытиями. В щелевых и троллейных шинопроводах встречаются также медные и биметаллические (алюминиево-медные) шины плоского, квадратного, круглого сечения или специальных профилей. Число шин в трёхфазных шинопроводах

может быть от трёх до пяти. Некоторые примеры расположения шин в трёхфазных комплектных шинопроводах приведены на рис.15.

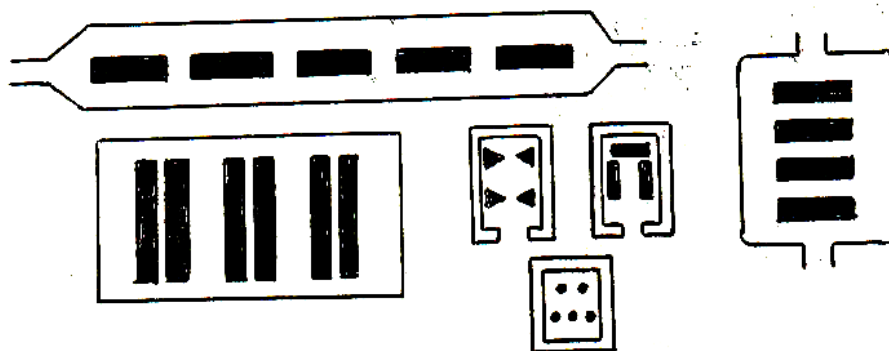


Рис.15. Примеры расположения шин в трёхфазном комплектном шинопроводе

Все шинопроводы имеют сходную конструкцию: плоские шины располагаются широкими сторонами друг к другу. При больших токах в магистральных шинопроводах шины спарены. Шинопроводы выпускаются для сети постоянного тока с чётным количеством шин, для трёхпроводной сети – с количеством шин, кратным трём, а для четырёхпроводной сети – с четырьмя шинами.

Конструкция шинопровода является самонесущей, где шины определяют жёсткость конструкции. Шины не имеют жёсткого крепления на изоляторах и при температурных изменениях могут свободно перемещаться вдоль оси короба.

Для увеличения теплоотдачи, защиты от окисления и лучшего распознавания фаз и полярности шины окрашивают эмалевыми красками. В соответствии с ПУЭ шины должны быть окрашены при переменном токе: фаза А – жёлтая, фаза В – зелёная и фаза С – красная; при постоянном токе: положительная шина – красная, отрицательная – синяя.

Заземляющие проводники, все конструкции, провода и полосы сети заземления должны быть окрашены в чёрный цвет. Допускается окраска открытых заземляющих проводников в иные цвета, но при этом в местах присоединений они должны иметь не менее двух полос чёрного цвета с



промежутками между ними 150 мм. Места соединений шин друг с другом, места присоединений их к аппаратам и места установки заземлений не окрашиваются.

Основные преимущества шинопровода перед другими типами линий НН:

- малая стоимость и высокая скорость электромонтажных работ;
- высокая надёжность проводников и изоляции при современных конструкциях шинопровода;
- возможность незначительной реконструкции сети путём частичного демонтажа или добавления новых секций шинопроводов;
- возможность многократного использования секций и других узлов шинопроводов;
- демонтаж и вторичный монтаж не снижает показателей шинопровода;
- возможность использования шинопроводов для прокладки лотков проводов и кабелей и для подвески светильников, что снижает стоимость монтажа этих элементов и др.

По этим причинам шинопроводы стали основным видом линий электрических сетей НН многих цехов промышленных предприятий. Шинопроводы не могут применяться во взрывоопасных зонах, а также в сложных условиях окружающей среды.

**Шинопроводы постоянного тока напряжением до 1000 В.** На промышленных предприятиях для питания электродвигателей постоянного тока, питания электропечей и электролизных ванн и др. применяются шинопроводы постоянного тока. Такие шинопроводы выполняются на токи от 1 до 175 кА и напряжение от 6 до 1000 В. Распределительные шинопроводы предназначены для питания нескольких параллельно включенных потребителей постоянного тока, расположенных вдоль трассы шинопровода, а индивидуальные – для питания отдельных потребителей или установок большой мощности. На главных участках, где к шинопроводам подключается несколько преобразовательных агрегатов, шинопроводы нередко являются

сборными шинами подстанций. Распределительные шинопроводы в цехах промышленных предприятий рассчитаны на токи, не превышающие 6,3 кА, и напряжение от 230 до 910 В, и выполняются как открытой, так и закрытой конструкции. Ток и напряжение шинопроводов, предназначенных для питания отдельных потребителей большой мощности, колеблется в весьма значительных пределах.

Поскольку постоянный ток распределяется практически равномерно по сечению шин независимо от их формы, шинопроводы сооружают из шин прямоугольного сечения, наиболее удобных в конструктивном отношении. Распределение тока по отдельным шинам пакета может быть неравномерным только в результате неодинаковых условий охлаждения наружных и внутренних полос и, следовательно, различия в их омическом сопротивлении.

Основные технические данные магистральных шинопроводов постоянного тока типа ШМАД-70 и ШМАДК-70 приведены в табл.8.

Таблица 8

Основные технические данные магистральных шинопроводов  
постоянного тока

Серия	Номинальный ток, А	Электродинамическая стойкость, кА	Число и сечение шин на полюсе	Степень защиты по ГОСТ 14254-80
ШМАД-70	1600	60	2(80×8)	1P00
	2500	80	3(80×8)	1P00
	4000	110	3(120×10)	1P00
	6300	125	3(160×12)	1P00
ШМАДК-70	1600	60	2(80×8)	1P20
	2500	80	3(80×8)	1P20
	4000	110	3(120×10)	1P20
	6300	125	3(160×12)	1P20

Шинопроводы типа ШМАД-70 не имеют крышек и могут устанавливаться только в электропомещениях. Шинопроводы типа ШМАДК-70 закрыты крышками и могут устанавливаться как в электропомещениях, так и в

цехах промпредприятий. Шинопроводы собираются из отдельных секций: прямых длиной 750,1500,3000 и 4500 мм, подгоночных, а также угловых с изгибом шин на ребро и на плоскость. Секции шинопроводов состоят из неизолированных алюминиевых шин, скреплённых обоймами с изоляторами через каждые 750 мм. Обоймы соединены стальными опорными уголками, которые используются для заземления и крепления шинопроводов. Соединение шин секций между собой сварное.

Ответвления от шинопроводов ШМАДК-70 осуществляется с помощью ответвительных секций, а от шинопроводов ШМАД-70 – непосредственно шинами без применения ответвительных секций. Ответвительные секции в шинопроводах ШМАДК-70 устанавливаются только в месте стыка секций. Ответвления от шинопроводов серии ШМАД-70 могут выполняться в любом месте.

Номинальный ток ответвительных секций шинопроводов 1600 и 2500 А равен 630 А, а шинопроводов 4 и 6,3 кА – 1 кА.

Проблемы динамической стойкости шинопроводов, ответвлений к выпрямителям при КЗ в них, снижения врезного влияния сильных магнитных полей шинопроводов, увеличения индуктивности шинопроводов в цепи уравнительного тока и другие рассматриваются в специальных пособиях.

**Кабельные линии.** Кабели отличаются от других видов изолированных проводников наличием герметической оболочки, защищающей жилы и изоляцию кабеля от воздействия окружающей среды. Силовые кабели, применяемые в электрических сетях, состоят обычно из следующих основных элементов:

- токоведущие жилы (обычно в кабелях НН одна-шесть, в кабелях ВН одна или три) из алюминия или меди;
- многопроволочные жилы, спрессованные обычно для уменьшения поперечных размеров жил и расхода изоляционных и других материалов;

- многожильные кабели, в которых жилы могут иметь профильное (секторное, сегментное, эллипсное и др.) сечение;
- сглаживающее (выравнивающее электрическое поле) проводящее, плёночное покрытие жилы (у кабелей ВН);
- изоляция жил из пропитанной маслом или нестекающей массой бумаги, из полиэтилена, поливинилхлорида (кабели НН) или синтетического каучука (кабели напряжением до 10 кВ, особенно переносные); синтетическая изоляция успешно вытесняет широко используемую в настоящее время пропитанную бумажную изоляцию, причём особенно успешно применяется вулканизированная (сшитая, сетчатая) полиэтиленовая изоляция в кабелях ВН;
- проводящее экранирующее плёночное покрытие изоляции (у кабелей ВН);
- поясная изоляция (у многожильных кабелей);
- герметическая оболочка из металла (алюминия или свинца) или полимерных материалов (поливинилхлорида, синтетического каучука, полиэтилена, полипропилена и др.), иногда в виде шланга (у переносных кабелей);
- бронь (в случае необходимости защиты от механических повреждений) из стальных лент или проволок;
- антикоррозионное покрытие брони (битум, пропитанный битумом джут).

Кроме этих элементов, в состав кабелей могут входить дополнительные жилы для использования во вторичных цепях (контрольные жилы), а также трос для подвески (в воздушных кабелях) и др.

Благодаря разнообразию используемых материалов и конструктивных исполнений кабели применяют в электрических сетях всех классов напряжений как внутри зданий и сооружений, так и на территории и во внешнем электроснабжении предприятия.

Внутри зданий, сооружений, промпредприятий применяют следующие виды прокладки кабелей:

- открытая по стенам и поверхностям строительных конструкций;
- в открыто или скрыто проложенных металлических трубах;
- в кабельных лотках и коробках;
- в кабельных каналах;
- подвешивание на несущем тросе;
- протягивание по воздуху тросовых кабелей;
- в кабельных сооружениях, являющихся частями зданий (на кабельных этажах, в двойных полах, в кабельных шахтах и т.п.).

Внутри помещения и кабельных сооружений применяют в зависимости от вероятности случайных механических повреждений бронированные или небронированные кабели без горючих наружных покровов. Чтобы защитить открыто проложенные кабели (например, в лотках) от огня, применяют огнестойкую засыпку или заливку затвердевающей огнестойкой массой. В местах перехода кабельных линий из одного помещения в другое применяют огнепреграждающие блоки.

По территории предприятий кабели прокладывают в кабельных сооружениях или (при малом числе кабелей на трассе) следующим образом:

- по наружным несгораемым стенам зданий или по несгораемым поверхностям наружных сооружений предприятия;
- непосредственно в земле, в траншеях;
- в трубах, проложенных открыто или под землёй;
- по воздуху (на тросе или путём применения тросовых кабелей).

В системе электроснабжения промпредприятий обычно применяют типовые кабельные сооружения и конструкции. В кабельных туннелях прокладываются небронированные кабели с металлической или полимерной оболочкой. Общее число кабелей в туннеле может достигать до 100. Кабели прокладывают на металлических консолях с расстоянием между ними 0,8-1 м

или на лотках. Кроме силовых кабелей в кабельных туннелях прокладывают кабели связи, контрольные и другие кабели, размещаемые при этом только под силовыми кабелями или только над ними и отделяемые от них несгораемыми перегородками.

При меньшем числе кабелей (обычно не более 20...30) вместо туннелей могут применяться кабельные каналы или надземные бетонные кабельные лотки. Одним из наиболее экономичных решений при большом числе кабелей на одной трассе является сооружение кабельных эстакад и галерей. Эстакады обычно применяют при 15...50 кабелях, а при большем числе кабелей – галереи. Высота эстакад и галерей до земли определяется типом пересекаемых дорог и сооружений, например, высота над полотном автомобильных дорог должна быть не менее 4,5 м.

Как указано выше, при малом числе кабелей (1...6 кабелей), они могут прокладываться в траншее, в подземных блоках (2...30 кабелей), по стенам зданий, по технологическим эстакадам, галереям и другим сооружениям, а также по воздуху.

Для подземной укладки в кабельных блоках, составленных из параллельных труб, в настоящее время используют, главным образом, железобетонные, асбоцементные и полимерные трубы внутренним диаметром 90...100 мм. По хорошему сочетанию технологических качеств (малая масса, высокая ударная прочность, гладкая внутренняя поверхность с малым коэффициентом трения) особенно выделяют полипропиленовые трубы.

Кабельные линии считают достаточно универсальными устройствами передачи электроэнергии. Особенно выгодно их применение при передаче энергии в сетях ВН, а в сетях НН при относительно длинных линиях, в случае тяжёлых условий окружающей среды, в случае применения неразветвлённых линий. Для передачи больших мощностей вместо одного трёхфазного кабеля могут при необходимости применяться несколько (обычно два-три) параллельных трёхфазных кабелей, защищаемых общим или в случае более высоких требований к надёжности линии отдельными выключателями, или три

однофазных кабеля большого сечения (1000 мм<sup>2</sup> и более). Комплектные, снабжённые кожухом конструкции из трёх одножильных кабелей называют кабельными токопроводами.

**Выбор токоведущих частей.** Выбор сечения шин и ошинок производится по нагреву (по допустимому току). При этом учитываются не только нормальные, но и последовательные режимы, а также режимы в период ремонтов и возможность неравномерного распределения токов между секциями шин. Условие выбора

$$I_{\max} \leq I_{\text{доп}}. \quad (4)$$

Проверка шин на термическую стойкость при КЗ производится по условию

$$\vartheta_k \leq \vartheta_{k\text{доп}} \text{ или } q_{\min} \leq q, \quad (5)$$

где  $\vartheta_k$  - температура шин при нагреве током КЗ;  $\vartheta_{k\text{доп}}$  - допустимая температура нагрева шин при КЗ;  $q_{\min}$  - минимальное сечение по термической стойкости;  $q$  – выбранное сечение.

Проверка шин и ошинок на электродинамическую стойкость по условию

$$\sigma_{\text{расч.}} \leq \sigma_{\text{доп.}}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{\text{доп.}}$  - допустимое напряжение в материале шины, которое согласно ПУЭ принимается равным 70% разрушающего напряжения в материале, Па;  $\sigma_{\text{расч.}}$  - максимальное расчётное напряжение в материале шины, вызванное электродинамическими силами, Па.

Согласно ПУЭ сборные шины электроустановок и ошиновка в пределах открытых и закрытых РУ всех напряжений по экономической плотности тока не проверяются.

**Кабели** выбирают:

- по напряжению электроустановки  $U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$ ;
- по конструкции (табл.9);
- по экономической плотности тока

$$q_{\text{э}} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{I_{\text{э}}}, \quad (7)$$

где  $I_{\text{э}}$  - нормированная плотность тока, А/мм<sup>2</sup>;

- по допустимому току  $I_{\text{max}} \leq I_{\text{доп}}$ , где  $I_{\text{доп}} = K_1 K_2 I_{\text{доп.ном}}$  - длительно допустимый ток с учётом поправки на число рядом положенных в земле кабелей  $K_1$  и на температуру окружающей среды  $K_2$ . Поправочные коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  и допустимый ток находят по справочникам или ПУЭ.

Таблица 9

## Кабели, рекомендуемые для прокладки в земле и воздухе

Область применения	С бумажной пропитанной изоляцией	С пластмассовой и резиновой изоляцией
В земле (в траншеях) со средней коррозионной активностью: без блуждающих токов с наличием блуждающих токов.	ААШВ, ААШп, ААПл ААШп, ААП2л, ААБ2л	АПв БьШв, АВБьШв АПАШв, АПАШп, АВАШв
Прокладка в туннелях, каналах, кабельных полуэтажах, производственных помещениях: сухих сырых сырых с высокой коррозионной активностью.	ААГ, ААШв, ААБлГ ААШв, ААБлГ, ААБв ААШв, ААБвГ, ААБ2лШл	АВВГ, АВРГ АВВБГ, АВРБГ АВБьШв, АПАШв
Прокладка в пожароопасных помещениях	ААГ, ААШв, ААБвГ	АВВГ, АВРГ, АПсВГ, АВВБГ, АВВБьГ, АВБьШв

При выборе сечения кабелей следует учитывать допустимую перегрузку их, определяемую по ПУЭ в зависимости от вида прокладки, длительности максимума и предварительной нагрузки.



Выбранные по нормальному режиму кабели проверяют на термическую стойкость по условию

$$g_k \leq g_{k \text{ доп}} \text{ или } q_{\min} \leq q.$$

При этом кабели небольшой длины проверяют по току при КЗ в начале кабеля. Одиночные кабели со ступенчатым сечением по длине проверяют по току при КЗ в начале каждого участка. Два параллельных кабеля и более проверяют по токам при КЗ непосредственно за пучком кабелей, т.е. с учётом разветвления тока КЗ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Р.С. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В.-М.: Энергия, 1970. 543 с.
2. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1986. 640 с.
3. Электротехнический справочник.: в 3-х т. Т.2. Электротехнические устройства. / Под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жукова и др. – М.: Энергоиздат, 1981. 640 с.
4. Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции. Учебник для вузов ж.д. транспорта. – М.: Транспорт, 1986. 319 с.
5. Прохорский А.А. Тяговые и трансформаторные подстанции. – М.: Транспорт, 1983. 496 с.
6. Чунихин А.А., Жаворонков М.А. Аппараты высокого напряжения – М.: Энергоатомиздат, 1985. 432 с.
7. Таев И.С. Электрические аппараты управления. – М.: Высшая школа, 1969. 441 с.
8. Электрическая часть электростанций. / Под ред. С.В. Усова. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1977. 556 с.
9. Руцкий А.А. Электрические станции и подстанции. – Минск. Высшая школа, 1974. 440 с.
10. Неклепаев Б.Н. Координация уровней токов короткого замыкания в электрических системах, – М.: Энергия, 1978. 152 с.
11. Электрическая часть станций и подстанций. / Под ред. А.А. Васильева. Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. 608 с.
12. Яковлев В.Н. Электрические железные дороги. Тяговые подстанции./ Под ред. Г.С. Артёменко. – Ашгабад.: Ылым, 1995. 212 с.
13. Пантелеев Е.Г. Монтаж и ремонт кабельных линий: Справочник электромонтажника./ Под ред. А.Д.Смирнова и др. –М.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.

**Оглавление**

1. Плавкие предохранители .....	3
Принцип работы .....	11
Конструкция предохранителей высокого напряжения .....	11
Выбор предохранителей .....	17
2. Быстродействующие плавкие предохранители .....	18
Назначение и конструкция предохранителя .....	18
Основные характеристики длительного режима .....	23
Номинальное напряжение .....	23
Потери мощности .....	24
Зависимость номинального тока от внешних факторов .....	24
Защитные характеристики предохранителей .....	25
Материалы плавких вставок .....	27
Наполнители современных предохранителей .....	34
Перспективы развития быстродействующих предохранителей .....	37
3. Изоляторы .....	38
Опорные изоляторы .....	41
Проходные изоляторы .....	44
Материалы, применяемые для изготовления изоляторов .....	45
4. Шинопроводы и кабельные линии .....	47
Токопроводы .....	48
Шины .....	48
Трёхфазные шинопроводы напряжением до 1 кВ .....	53
Шинопроводы постоянного тока напряжением до 1000 В .....	56
Кабельные линии .....	58
Выбор токоведущих частей .....	61
Кабели .....	62
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	64