

А 447

С. П. КОСОЛАПОВ

**ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ  
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

15 203

Куйбышев 1985  
Куйбышевский авиационный институт

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РСФСР

ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

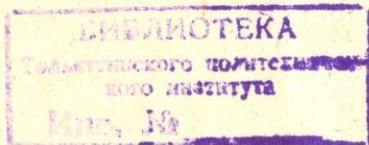
КАФЕДРА  
"Электроснабжение промышленных предприятий городов  
и сельского хозяйства"

С. П. КОСОЛАПОВ

ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ  
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ПРЕДПРИЯТИЙ

Учебное пособие

Куйбышев 1985



Куйбышевский авиационный институт

Косолапов С.П.      Защита от перенапряжений в системах электро-  
снабжения промышленных предприятий.  
Учебное пособие.- Куйбышев: КуАИ, 1985, 80 с.

Рассмотрены вопросы образования атмосферного электричества и защиты линий электропередачи, подстанций и вращающихся электрических машин от грозовых воздействий. Кратко изложены конструктивные особенности и области применения защитных трубчатых и вентильных разрядников. Приведены рекомендации по выполнению защиты оборудования от набегающих с линии волн перенапряжений заземления в установках высокого напряжения. Рассмотрены причины возникновения внутренних перенапряжений и способы их ограничения.

Пособие предназначено для студентов специальности 0303 "Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства", а также может быть использовано студентами специальности 0601 "Электрические машины".

Рецензенты : специальное проектно-конструкторское бюро по трансформаторам СВПО "Трансформатор" (главный инженер СКБ к.т.н. Ю.И.Борк);  
к.т.н. П.В.Белов, зав.сектором отдела ОI отделения ВЭИ им. В.И.Ленина

Научный редактор зав.кафедрой ЭШ ТПИ к.т.н. доцент Г.В.Воробьев.  
Утверждено редакционно-издательской секцией методического совета  
в качестве учебного пособия

© Тольяттинский политехнический институт, 1985.

## 1. Грозные перенапряжения

### 1.1. Физические процессы образования атмосферного электричества

Процесс образования электрических зарядов в облаках происходит в электрическом поле земли. Электрическое поле в атмосфере наблюдается постоянно. При хорошей погоде его напряженность у поверхности земли в среднем составляет 130 В/м, а над поверхностями морей и океанов — 110 В/м. Направлено поле так, как если бы Земля обладала отрицательным избыточным зарядом. На высоте 100... 200 км находится ионосфера — слой Хевисайда. Она содержит сильно ионизированный за счет ультрафиолетового излучения Солнца и космических лучей разреженный газ, обладающий низким удельным сопротивлением. Поверхность земли и ионосфера представляют собой как бы обкладки гигантского конденсатора, заряженного до напряжения приблизительно 300 кВ. Первая научная гипотеза образования грозового облака была сформулирована в 1753 г. М.В. Ломоносовым в работе "Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих ...". Согласно этой гипотезе облако образуется в процессе быстрого перемещения в вертикальном направлении воздуха при его охлаждении и конденсации содержащейся в нем влаги. Вследствие трения частички паров и восходящий поток воздуха взаимно электризуются, и образуется атмосферное электричество. Молнию М.В. Ломоносов рассматривал как разряд атмосферного электричества на землю и между облаками. В настоящее время различают три типа гроз: тепловые, фронтальные и зимние. Тепловая гроза начинается при наличии восходящих потоков воздуха, нагревающегося у поверхности земли. По мере подъема эти массы воздуха, насыщенного влагой, охлаждаются, и влага конденсируется в виде облаков. Фронтальная

гроза образуется при столкновении масс воздуха, имеющих различную температуру. На фронте столкновения более теплые массы воздуха вытесняются вверх, охлаждаются, и происходит конденсация содержащейся в них влаги в виде облаков. Наблюдения показывают, что при появлении в облаке смеси из жидкой и твердой фаз воды начинается электризация частиц жидкости и разделение электрических зарядов за счет энергии восходящих потоков воздуха. Причиной зимних гроз является фотоионизация кристалликов льда в верхних слоях атмосферы. Частицы влаги внутри грозового облака, поляризованные полем хорошей погоды и полями образующихся в облаке зарядов, претерпевают столкновения, дробление, трение друг о друга и испарение.

Каждое из этих воздействий способно вызвать электризацию частиц, и в результате на них накапливаются избыточные положительные или отрицательные заряды. В процессе электризации мелкие и крупные частицы могут приобретать различные по величине и по знаку электрические заряды. Разделение мелких и крупных частиц восходящими потоками воздуха одновременно приводит и к разделению зарядов внутри облака. Исследования показывают, что верхняя часть облака имеет избыток положительного заряда, а нижняя — отрицательного.

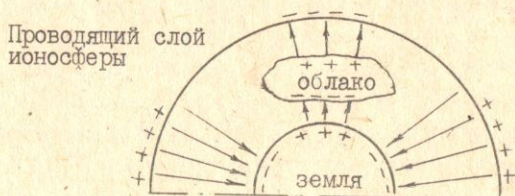


Рис. I.I. Расположение зарядов, создающих поле хорошей погоды

Электрический разряд между заряженными областями грозового облака и землей может происходить в виде линейной, шаровой молнии и тихого разряда. Линейная молния в основных чертах подобна

электрическому разряду между электродами генератора импульсов напряжения и является основным источником возникновения атмосферного электричества и грозových перенапряжений. Шаровая молния появляется в виде ярко светящегося подвижного тела, способного перемещаться в атмосфере и проникать сквозь твердые перегородки (оконные стекла и т.п.). По одной из существующих гипотез, шаровая молния возникает на месте изгиба линейной молнии. Электродинамические силы, действующие в месте резкого изгиба, отрывают часть плазмы. Просуществовав автономно некоторое время, шаровая молния распадается, причем иногда ее исчезновение сопровождается взрывом. При попадании в линию шаровая молния не создает больших перенапряжений. Тихий разряд (огни святого Эльма) возникает на острых возвышающихся предметах во время грозы при высокой напряженности поля над поверхностью земли. Этот вид разряда также не является источником существенных перенапряжений.

Основной предпосылкой для развития линейной молнии является образование достаточно высокой плотности избыточных зарядов положительной или отрицательной полярности в ограниченном объеме ячейки грозового облака и связанное с этим повышение средней напряженности электрического поля до 100...500 кВ/м. При этом возникают условия для развития лавин электронов, приводящих к формированию стримерных каналов.

Токи отдельных стримеров, сливаясь, разогревают отдельные каналы до температуры, при которой проводимость канала резко возрастает за счет термической ионизации газа, и образуется канал лидера. Через проводящий канал лидера потенциал облака передается головке лидера, вокруг которой развивается зона стримерных разрядов. Стримеры выносят отрицательный заряд из канала лидера и создают вокруг него объемный заряд. Направление продвижения головки лидера зависит от местных неоднородностей поля и структуры воздушных масс и поэтому не является стабильным. Когда стримерная зона лидера достигает верхних частей высоких объектов, происходит ориентация пути лидера на них. Этому могут способствовать и встречные лидеры, развивающиеся от высоких наземных объектов навстречу лидеру молнии. Соединение каналов нисходящего и встречного лидеров или прорастание канала нисходящего лидера до поверхности земли является завершением начальной стадии развития молнии — создания непрерывного проводящего канала от заряженной части облака к земле. До соприкосновения с наземными объектами потенциал ниж-

него конца канала близок к потенциалу облака. Во время контакта этот потенциал снижается на 2 ... 3 порядка. Это возмущение распространяется от земли вверх по каналу со скоростью, близкой к скорости света. Снижение потенциала в канале приводит к резкому возрастанию радиальной напряженности электрического поля между объемными зарядами и каналом лидера, а также формированию стримеров "возвратного" разряда, благодаря которым объемный заряд начинает стекать в землю. Этот этап называется главной стадией разряда молнии. Яркое свечение канала главной стадии и воспринимается глазом как вспышка молнии, а быстрое расширение газа при нагреве током главной стадии и его последующее охлаждение и сжатие порождают акустическую волну — гром молнии.

**П а р а м е т р ы** импульса тока молнии. Типичная форма импульса тока в пораженном молнией объекте имеет вид, показанный на рис. 1.2. С точки зрения грозозащиты главными параметрами импульса тока молнии являются его амплитуда и крутизна нарастания  $di_M/dt$ . Для определения длительности фронта импульса  $\tau_f$  на графике импульса отмечают точки фронта, соответствующие значениям тока  $0,3 I_M$  и  $0,9 I_M$ . Через эти точки проводят прямую до пересечения с нулевым значением тока (ось абсцисс) и с уровнем амплитуды тока (ось ординат). Проекция точек пересечения на ось абсцисс условно принимают за моменты начала импульса и наступления амплитуды импульса, а интервал времени между ними — за длительность фронта.

Длину волны, или длительность импульса тока молнии, принято оценивать временем полураспада  $\tau_M$ , т.е. интервалом времени от условного начала импульса до того момента, когда прошедшая через максимум кривая импульса снизится до значения тока, равного половине амплитуды.

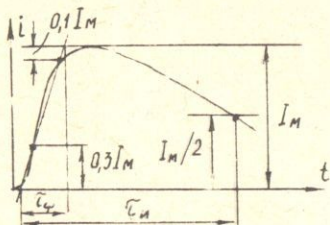


Рис.1.2. Определение параметров импульса тока молнии

Тепловое воздействие тока молнии.

Удары молнии в наземные объекты часто сопровождаются пожарами и механическими разрушениями. Количество тепла, выделяющегося в проводнике при прохождении тока молнии, состоящей из  $m$  единичных разрядов

$$Q = 0,24 \tau \sum_{k=1}^m I_k q_k / 2 \approx 0,12 I_{cp} \tau \sum_{k=1}^m q_k,$$

где  $I_k$ ,  $q_k$  - средний ток, кА, и-переносимый в землю заряд, Кл,  $k$ -го единичного разряда;  $I_{cp}$  - средний ток многократной молнии, кА;  $\sum q_k$  - общий заряд многократной молнии, Кл;  $\tau$  - активное сопротивление проводника с учетом поверхностного эффекта.

Температура,  $^{\circ}\text{C}$ , до которой нагревается проводник, определяется по формуле

$$t = \frac{Q}{s \ell \rho c} = \frac{5 k \rho I_{cp} \sum_{k=1}^m q_k}{s^2 \gamma c},$$

где  $S$  - сечение проводника, м;  $\ell$  - длина проводника, м.;  $\gamma$  - удельная масса проводника, кг/м;  $c$  - удельная теплоемкость, кДж/кг  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho$  - удельное сопротивление проводника, Ом $\cdot$ м;  $k$  - коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта.

Стальной проводник сечением 50 мм<sup>2</sup> в течение 1 с нагревается до нескольких сотен градусов при наиболее интенсивных разрядах.

При ударах молнии в объекты с плохой проводимостью (деревянные опоры, деревья, кирпичные здания) могут возникать серьезные разрушения, так как ток молнии проходит по путям повышенной проводимости во внутренних частях объекта. За счет нагревания влаги током молнии и испарения ее внутри объекта происходит резкое увеличение давления, которое и приводит к разрушению.

## 48, I.2. Краткие сведения о волновых процессах при воздействии молнии

При ударе молнии в линию электропередачи на проводах создается высокое напряжение относительно земли, под действием которого в обе стороны от места удара вдоль линии распространяются



электромагнитные волны. Дойдя до подстанции, набегающие с линии волны создают перенапряжение на изоляции оборудования. При про- беге вдоль линии волна напряжения претерпевает деформацию, пре- ломление на элементах подстанции и отражение в обратном направ- лении.

Основным источником деформации волн в линиях высокого напря- жения является коронный разряд, который возникает, если напряже- ние распространяющейся волны превышает критическое. При наличии короны все остальные источники активных потерь отступают на зад- ний план, и в дифференциальных уравнениях длинной линии можно пренебречь активным сопротивлением и проводимостью, после чего они принимают вид

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L' \frac{\partial i}{\partial t}; \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = C_g' \frac{\partial u}{\partial t}$$

Приведенная система уравнений имеет ту же структуру, что и линия без потерь, поэтому ее решение можно представить в виде

$$u = f(x - vt),$$

где  $v = 1/\sqrt{L'C_g'}$  - фазовая скорость;  $L'$  и  $C_g'$  - динами- ческие индуктивность и емкость. В отличие от линии без потерь скорость  $v$  не является постоянной величиной, а зависит от напряжения. Именно это обстоятельство и обуславливает дефор- мацию волны под действием короны. Чтобы проанализировать эту дефор- мацию, разобьем условно движущуюся волну на элементарные волны  $du_i$  (рис. I.3), каждая из которых распространяется со скоростью  $v$ , определяемой напряжением  $u_i$  и соответствующим значением динамической емкости  $C_d = f(u)$ .

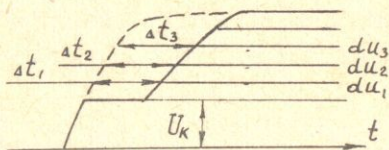


Рис. I.3. Деформация фронта волны в коронирующей линии

По мере продвижения волны вдоль линии при  $u_i > U_k$  "верхние"

участки волны будут постепенно отставать от "нижних", так как с ростом напряжения фазовая скорость  $U$  уменьшается ( $C_d$  растет). Благодаря этому и происходит деформация фронта волны.

Из курса теоретических основ электротехники известно, что для расчета напряжения на произвольном сопротивлении  $Z(\rho)$ , включенном в конце линии без потерь, справедлива схема замещения, в которой э.д.с. источника равна удвоенному напряжению падающей волны  $2u(t)$  внутреннее сопротивление источника волновому сопротивлению линии  $Z$  и к зажимам источника подключено сопротивление  $Z(\rho)$ . Анализ уравнений линии без потерь позволяет сделать ряд выводов.

Если в конце линии включено активное сопротивление  $Z$ , то напряжение в конце линии

$$u_2 = 2u(t)Z/(Z+Z) = \alpha u(t),$$

где  $\alpha = 2Z/(Z+Z)$  - коэффициент преломления. Закон изменения этого напряжения во времени соответствует закону изменения во времени падающей волны.

Падение волны на узловую точку приводит к появлению преломленной и отраженной волн. Если анализ производится в операторной форме, то изображение отраженной волны, т.е. волны, двигающейся в обратном направлении, имеет вид

$$U_{отр}(\rho) = U_2(\rho) - U(\rho) = U(\rho) \frac{Z(\rho) - Z}{Z(\rho) + Z},$$

где  $Z(\rho) - Z/Z(\rho) + Z = \beta$  - коэффициент отражения.

Если от подстанции отходит  $n$  линий (рис. I.4) и по одной из них на подстанцию падает волна напряжения произвольной формы, то, учитывая, что бесконечно длинные линии в схемах замещения представляются в виде активных сопротивлений, равных по величине волновым сопротивлениям, напряжение на шинах подстанции

$$u_2(t) = \frac{2u(t)Z/(n-1)}{Z/(n-1) + Z} = \frac{2}{n} u(t).$$

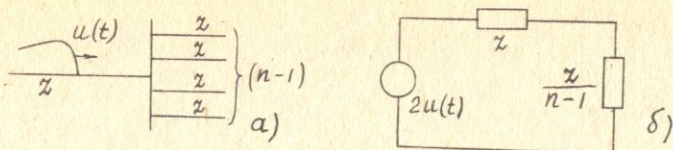


Рис. I.4. Падение волны перенапряжений на шины подстанции (а); схема замещения (б)

Следовательно, при  $n = 1$  (тупиковая подстанция) напряжение на шинах равно удвоенному напряжению падающей волны. Тупиковая подстанция находится в наиболее неблагоприятных условиях.

Если на шинах подстанции включена емкость и постоянная времени схемы соизмерима с постоянной времени падающей волны, то емкость снижает максимальное напряжение на шинах подстанции.

Если между двумя линиями включена индуктивность, то схема может соответствовать случаю, когда на подстанции установлен реактор. Индуктивность оказывает такое же влияние на проходящую волну, как емкость, включенная параллельно на стыке двух линий, т.е. существенно сглаживает фронт волны, если постоянная времени схемы  $T > \zeta_{\phi}$ , и снижает максимальное значение волны, если постоянная времени схемы соизмерима с длиной волны. Схемы замещения при прохождении волны мимо емкости и через индуктивность показаны на рис. I.5.

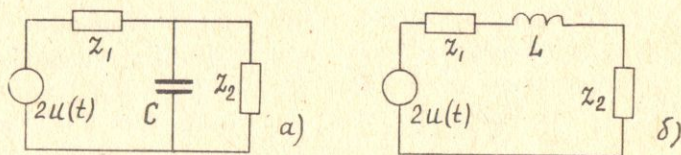


Рис. I.5. Схемы замещения при прохождении волны мимо емкости (а), через индуктивность (б)

При переходе волны с воздушной линии на кабельную ( $z_1 > z_2$ )

амплитуда преломленной волны напряжения уменьшается, так как

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} < 1$$

Например, при волновом сопротивлении воздушной линии  $Z_1 = 400$  Ом и кабельной линии  $Z_2 = 40$  Ом коэффициент преломления  $\alpha = 0,18$ . При обратном переходе с кабельной линии на воздушную при тех же сопротивлениях  $\alpha = 1,8$ , т.е. амплитуда волны возрастает в два раза.

В случае падения волны на конец линии, замкнутой накоротко, (сопротивление нагрузки  $Z_H = 0$ , коэффициент преломления  $\alpha = 0$ , коэффициент отражения  $\beta = 1$ ) волна напряжения отражается с обратным знаком.

Все отмеченные особенности прохождения волны перенапряжений необходимо учитывать при разработке мероприятий по защите изоляции от грозových перенапряжений.

### 1.3. Защита от прямых ударов молнии

Молниеотводы как средство защиты от прямых ударов молнии применялись для защиты храмов от "небесного огня" задолго до нашей эры, но получили всеобщее признание только в середине 18 века благодаря работам М.В. Ломоносова и В. Франклина.

Назначение молниеотводов – воспринять подавляющее число ударов молнии в пределах защищаемой территории и отвести ток молнии в землю. В настоящее время каждый молниеотвод состоит из молниеприемника, возвышающегося над защищаемым объектом, заземлителя и токоотводящих спусков, соединяющих молниеприемник с заземлителем. По типу молниеприемников различают стержневые и тросовые молниеотводы. Стержневые молниеотводы выполняются в виде вертикально установленных стержней (мачт), соединенных с заземлителем, а тросовые – в виде горизонтально подвешенных тросов.

Защитное действие молниеотводов основано на явлении избирательной поражаемости молнией высокоточных объектов. Высота над поверхностью земли, при которой лидер начинает ориентироваться по направлению к наиболее высокому наземному объекту, называется

высотой ориентировки молнии  $H$ . Опытами, проведенными в лаборатории, установлено, что над молниеотводом высотой  $h$  (при  $H/h = 20$ ) существует зона в виде перевернутого конуса с радиусом  $R = 3,5h$  в основании, с которой все разряды собирает на себя молниеотвод. Эта зона получила название 100% - ного поражения стержневого молниеотвода (рис. 1.6).

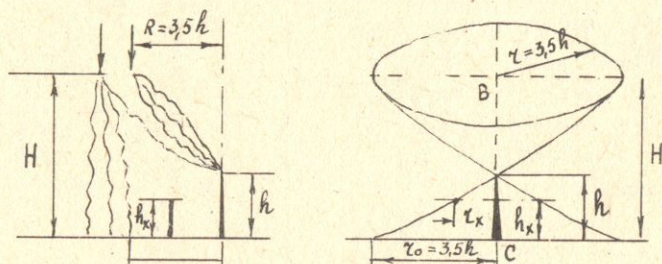


Рис. 1.6. Определение зоны 100% - ного поражения стержневого молниеотвода

Стержневые молниеотводы. Вокруг молниеотвода высотой  $h$  имеется зона, не поражаемая разрядами. Минимальное расстояние от вертикали ВС, равное  $r_0 = 3,5h$ , является радиусом зоны защиты молниеотвода на уровне земли. Радиус зоны защиты  $r_x$  на высоте  $h_x$  представляет собой "шатер" (рис. 1.7) и может быть определен по формуле

$$r_x = \frac{1,6 h_a}{1 + h_x/h} ,$$

где  $h$  - высота стержневого молниеотвода, м;  $h_x$  - высота точки на границе защищаемой зоны, м;  $h_a = h - h_x$  - активная высота молниеотвода, м;  $p$  - коэффициент для разных высот молниеотводов. Для молниеотводов высотой до 30 м коэффициент равен единице, более 30 м  $p = 5,5/\sqrt{h}$ . Так строятся зоны защиты для одиночных стержневых молниеотводов высотой до 60 м. Пространство вблизи молниеотвода, защищенное от прямых ударов молнии, называется защитной зоной молниеотвода. У молниеотводов высотой более 60 м поражается молнией не только его вершина, но и боковые части на некотором расстоянии от вершины

вниз. Защитная зона молниеотвода высотой от 60 до 250 м ограничивается высотой  $h - \Delta h$ . Для молниеотводов высотой от 60 до 100 м расстояние  $\Delta h$ , м, подсчитывается по формуле

$$\Delta h = 0,5(h - 60).$$

Для молниеотводов высотой от 100 до 250 м  $\Delta h = 0,2h$ .

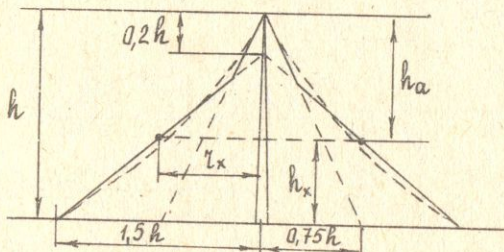


Рис. 1.7. Построение зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода

Известен упрощенный метод построения очертаний защитной зоны одиночного стержневого молниеотвода, в котором криволинейная граница зоны защиты заменяется прямыми отрезками (рис. 1.8). Защитное действие молниеотвода в этом случае [2,6] характеризуется вероятностью прорыва молнии, которую определяют как отношение числа разрядов молнии в объект к полному числу ударов молнии в систему объект-молниеотвод-земля при наиболее неблагоприятном расположении точки ориентировки молнии по отношению к объекту. Пространство около молниеотвода, внутри которого вероятность прорыва ниже некоторой достаточно малой для практики величины (например,  $P_{пр} = 0,005$ ), называется зоной защиты молниеотвода. Для одиночного стержневого молниеотвода высотой  $h \leq 150$  м зона защиты представляет собой круговой конус с вершиной на высоте  $h_0 < h$ , сечение которого на высоте  $h_x$  имеет радиус  $r_x$ . Граница зоны защиты, соответствующая вероятности прорыва  $P_{пр} = 0,005$ , находится по формулам

$$h_0 = 0,85h$$

$$r_x = (1,1 - 0,002h) \left( h - \frac{h_x}{0,85} \right),$$

где значение  $h_0 < h$  учитывает возможность прорыва молнии сбоку.

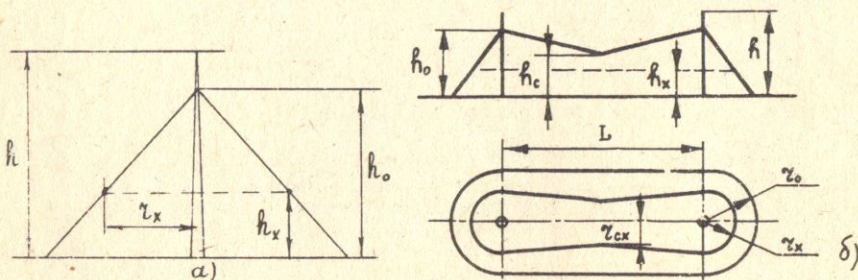


Рис. 1.8. Зоны защиты молниеотводов: а - одиночного стержневого; б - двухстержневого; по упрощенному методу

Если определяется граница зоны защиты, соответствующая большей вероятности прорыва  $P_{пр} = 0,05$ , используются формулы

$$h_0' = 0,92h; \quad r_x' = 1,5 \left( h - h_x / 0,92 \right);$$

$$h = \frac{r_x' + 1,63 h_x}{1,5}$$

Двухстержневые молниеотводы. Очертания зоны защиты двух стержневых молниеотводов показаны на рис. 1.8 б. Габаритные размеры зоны двухстержневого молниеотвода рассчитываются по формулам для  $P_{пр} = 0,005$

$$h_c = \begin{cases} h_0 & \text{при } L \leq h \\ h_0 - (0,14 + 3 \cdot 10^{-4} h)(L - h) & \text{при } L > h \end{cases}$$

$$z_{cx} = \begin{cases} z_x & \text{при } L \leq h \\ [z_0(h_c - h_x)] / h_c & \text{при } L > h \end{cases}$$

для  $P_{пр} = 0,05$

$$h_c = \begin{cases} h_0 & \text{при } L \leq 1,5 h \\ h_0 - 0,14(L - 1,5 h) & \text{при } L > 1,5 h \end{cases}$$

$$z_{cx} = \begin{cases} z_x & \text{при } L \leq 1,5 h \\ [z_0(h_c - h_x)] / h_c & \text{при } L > 1,5 h \end{cases}$$

При известных  $h_c$  и  $L$  (при  $z_{cx} = 0$ ) высота молниеотвода для  $P_{пр} = 0,05$  определяется по формуле

$$h = \frac{h_c - 0,14 L}{1,13}$$

Если расстояние  $L$  между молниеотводами превышает  $3 h$  для  $P_{пр} = 0,005$  или  $5 h$  для  $P_{пр} = 0,05$ , каждый молниеотвод рассматривается как одиночный.

Несколько близко расположенных молниеотводов (например, три или четыре) способствуют взаимному усилению защитного действия и образуют многократный молниеотвод. Его зона защиты определяется попарными зонами защиты трех ближайших молниеотводов. Считается, что внутренние зоны защищены так же надежно, как и зона одиночного молниеотвода.

Открытые распределительные устройства подстанций защищаются обычно несколькими молниеотводами. В этом случае уровень внутри треугольника или прямоугольника, образуемого молниеотводами, будет защищен, если диаметр окружности, проходящей через проекции молниеотводов (или диагональ прямоугольника), удовлетворяет условию

$$D = 8 h_a \rho$$

При произвольном расположении четырех и более молниеотводов это условие должно быть проверено в отдельности для каждой



трех ближайших друг к другу молниеотводов. Внешняя часть зоны защиты определяется для каждой пары молниеотводов.

Тросовые молниеотводы. Для защиты протяженных объектов используются тросовые молниеотводы, представляющие собой проводящие тросы, натянутые над защищаемым объектом и заземленные на опорах. Конфигурация зоны защиты одиночного тросового молниеотвода (рис. I.9 а) определяется по формулам

$$\text{для } P_{\text{пр}} = 0,005 \quad h_0 = 0,85 h ,$$

$$r_x = (1,35 - 0,0025 h) \left( h - \frac{h_x}{0,85} \right) ;$$

$$\text{для } P_{\text{пр}} = 0,05 \quad h_0 = 0,95 h ,$$

$$r_x = 1,7 \left( h - \frac{h_x}{0,92} \right) .$$

Для системы из двух тросовых молниеотводов, расположенных параллельно на расстоянии  $L$ , наименьшая высота зоны защиты между ними  $h_c$  (рис. I.9 б) может быть определена по формуле при  $L \leq h$   $h_c = h_0$  ;

при  $L > h$   $h_c = h_0 - (0,14 + 5 \cdot 10^{-4} h) (L - h) .$

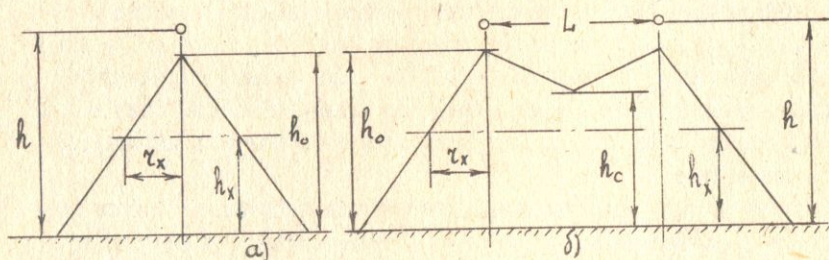


Рис. I.9 Зоны защиты тросовых молниеотводов:  
а - одиночного; б - двойного

На линиях электропередачи стальные или сталеалюминиевые тросы подвешивают на специальных тросостойках, установленных на вершинах опор. Главным параметром в этом случае является (рис. I.10) угол защиты  $\alpha$ , образованный вертикалью, проходящей через трос, и прямой, соединяющей трос с проводом.

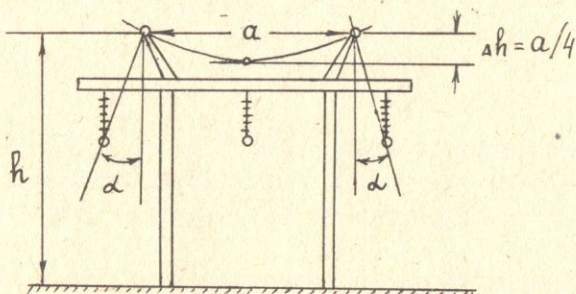


Рис. I.10. Угол защиты и зона защиты тросов на линии электропередачи

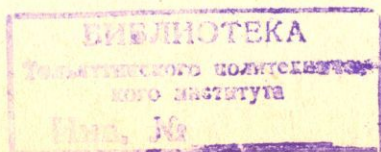
Внешняя часть зоны защиты двух параллельных тросовых молниеотводов, расположенных на расстоянии  $a$ , определяется так же, как и для одиночного тросового молниеотвода. Внутренняя часть ограничена поверхностью, которая в сечении плоская, перпендикулярной тросам, дает дугу окружности, проходящей через два троса и точку посередине на высоте  $h_0 = h - a/4r$ . Условие защиты среднего провода при горизонтальном расположении проводов и двух тросах

$$a \leq 4r(h - h_x) = 4r(h_{TP} - h_{TP})$$

всегда осуществляется с большим запасом. Для снижения вероятности прорыва молнии на линиях сверхвысокого напряжения уменьшают углы защиты  $\alpha$  на высоких опорах раздвижением тросостоек.

Порядок проектирования защиты от прямых ударов молнии

I. Определяются исходные данные: удельное сопротивление грунта на месте сооружения подстанции или другого объекта систе-



мы электроснабжения; план и площадь защищаемого объекта и его наиболее высокие точки, подлежащие защите.

2. Выбирается с учетом удельного сопротивления грунта и площади контура заземления подстанции конструкция молниеотвода — стержневой отдельно стоящий или установленный на конструкциях (порталах) ОРУ, а также место установки молниеотводов.

3. Определяется ориентировочная высота молниеотвода для вероятности прорыва молнии  $P_{пр} = 0,05$  по формуле

$$h = \frac{r_x + 1,63 h_x}{1,5}$$

Затем выбирается типовой молниеотвод [10, 13].

4. Выполняется чертёж зоны защиты молниеотводов (рис. I.11) и проверяется, обеспечивается ли необходимый радиус зоны защиты на высоте

5. Выполняется заземление молниеотвода с учетом положений, изложенных в [1.4 и 1.7].

Если необходима более высокая надежность грозозащиты, соответствующая вероятности прорыва молнии  $P_{пр} = 0,005$ , то выбирается следующий более высокий типовой молниеотвод и проверяется, обеспечивается ли необходимый радиус зоны защиты по формуле

$$r_x = (1,1 - 0,002 h)(h - h_x / 0,85).$$

Опоры молниеотводов высотой 18 м и более можно выполнить из стандартных стоек опор линии, соединенных с приставками длиной 7,5 метра. На вершине стойки опоры к стальной арматуре привариваются металлические плиты, на которых с помощью сварки укрепляются молниеприемники из стальных труб различного диаметра. Молниеприемники оцинковываются или окрашиваются.

Разработаны серии стержневых молниеотводов на железобетонных и металлических опорах [13] высотой до 40 м. Для освещения территории подстанции на опорах на высоте 10 ... 15 м устанавливаются площадки для прожекторов. Молниеотводы на железобетонных опорах закрепляются погружением в грунт на глубину до 3,5 м.

Заземление молниеотводов выполняется стальными прутками, трубами или уголками сечением не менее 48 ... 50 мм<sup>2</sup>.

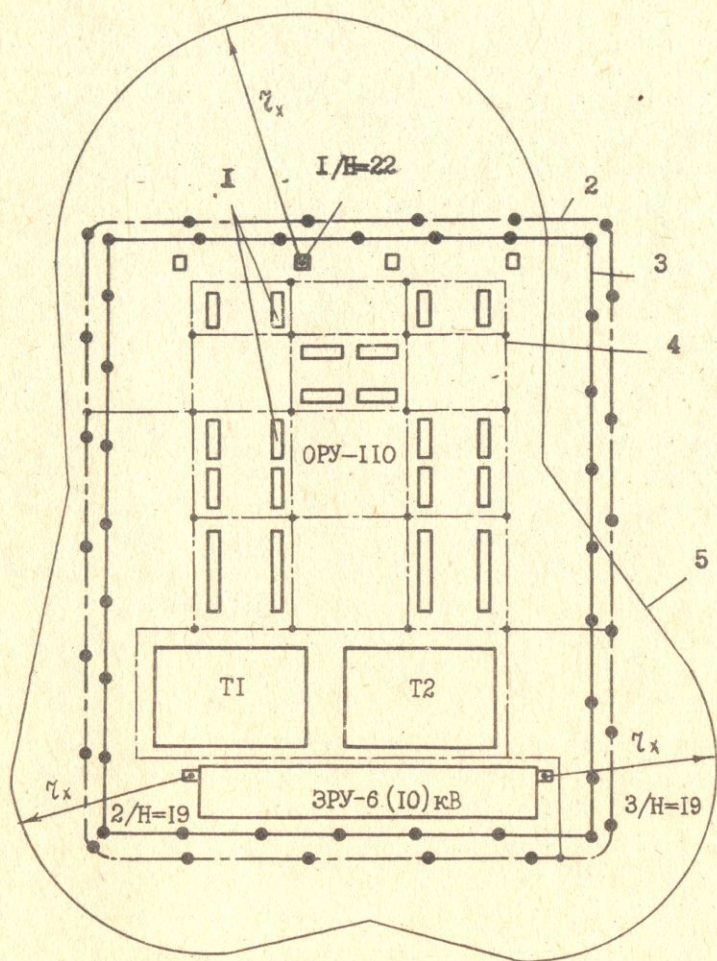


Рис. I.II. Схема расположения молниеотводов и их зоны защиты на понижающей подстанции КТПБ-110/10:  
 I - фундаменты оборудования; 2 - контур заземления; 3 - ограждение подстанции; 4 - сетка заземления на территории подстанции; 5 - зона защиты молниеотводов

#### 1.4. Заземления в электрических установках высокого напряжения

В установках высокого напряжения различают три вида заземлений: рабочее, защитное и грозозащиты. Причем один и тот же заземлитель может выполнять два или три назначения одновременно.

Рабочее заземление — заземление нейтралей силовых трансформаторов, генераторов, дугогасящих аппаратов, измерительных трансформаторов напряжения, реакторов и др.

Защитное заземление обеспечивает безопасность людей, обслуживающих установку, выполняется путем заземления металлических частей (например, баков трансформаторов), которые нормально имеют нулевой потенциал, но могут оказаться под напряжением при перекрывании или пробое изоляции.

Заземление грозозащиты служит для отвода тока молнии в землю от защитных разрядников, стержневых и тросовых молниеотводов и других конструкций, в которые произошел удар молнии.

Наиболее жесткие требования предъявляются к защитному заземлению. Оно, как правило, удовлетворяет требованиям рабочего заземления, а также во многих случаях служит для заземления средств грозозащиты и обеспечивает безопасную работу обслуживающего персонала. Опасность для обслуживающего персонала возникает, когда повреждается изоляция и через заземлитель протекает ток короткого замыкания на землю (рис. 1.12). При повреждении изоляции выключателя через заземлитель в землю будет протекать ток  $I_3$ . На расстоянии около 20 м вокруг заземлителя каждая точка поверхности земли приобретет потенциал. Бак выключателя и заземлитель окажутся под потенциалом  $U_3 = I_3 R_3$ . При прикосновении человека к баку выключателя его руки приобретут потенциал бака и заземлителя, а ноги получат потенциал  $U_H$ , значение которого можно найти по кривой 1.

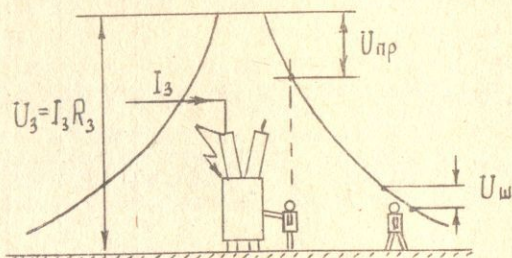


Рис. 1.12. Определение напряжения прикосновения и шага

Тело человека подвергается воздействию разности потенциалов  $U_{пр} = U_3 - U_n$ , которую называют напряжением прикосновения. Если человек не касается бака, а подходит к нему, то его правая и левая нога находится каждая под своим потенциалом. Разность этих потенциалов называют шаговым напряжением.

Наибольшие допустимые значения сопротивления заземлителя растеканию тока  $R_3$ , установленные Правилами устройства электроустановок, составляют для установок до 1000 В

10 Ом - при суммарной мощности генераторов или трансформаторов, питающих данную сеть, не более 100 кВт·А;

4 Ом - во всех остальных случаях. для установок выше 1000 В

0,5 Ом - при больших токах замыкания на землю, т.е. больше 500 А;

$250/I_3 < 10$  Ом - при малых токах замыкания на землю и при условии, что заземлитель используется только для электроустановок напряжением выше 1000 В;

$125/I_3 < 10$  Ом - при малых токах замыкания на землю и при условии, что заземлитель используется одновременно для установок напряжением до 1000 В.

При использовании естественных заземлителей сопротивление искусственного заземлителя  $R_n$ , Ом, меньше требуемого  $R_3$ , Ом, определяется по формуле

$$R_n = \frac{R_e R_3}{R_e + R_3},$$

где  $R_e$  - сопротивление растеканию естественного заземлителя, Ом.

Сопротивление естественных заземлителей можно вычислять по формулам для искусственных заземлителей аналогичной формы или специальными формулам.

Выбор типа заземлителя и составление предварительной схемы заземляющего устройства производится на основании данных с территории, на которой возможно размещение искусственного заземлителя, значений  $I_3$ ,  $R_n$ ,  $\rho$  и др. Заземляющие устройства могут быть выносного или контурного типа. После выбора формы электродов (обычно стержневые и полосовые) их ориентировочно

размещают на плане участка.

При расчете заземлителя в однородной земле способом коэффициентов использования вычисление  $R$  производится в следующем порядке:

1. Определяются по предварительной схеме заземлителя, нанесенной на план установки, длины горизонтальных  $l$  и количество  $n$  вертикальных электродов.

2. Вычисляется расчетное значение сопротивления одного вертикального электрода  $R_{в.о}$  по формулам  
 верхний конец электрода находится у поверхности земли

$$R_{в.о} = \frac{\rho_{расч.в}}{2\pi l_e} \ln \frac{4l_e}{d} ,$$

верхний конец электрода находится ниже уровня земли

$$R_{в.о} = \frac{\rho_{расч.в}}{2\pi l_e} \left( \ln \frac{2l_e}{d} - \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l_e}{4t - l_e} \right) ,$$

где  $l_e$  - длина электрода;  $d$  - внешний диаметр электрода;  
 $t$  - глубина погружения верхнего конца электрода ниже уровня земли. Коэффициент  $\rho_{расч}$  определяется с учетом сезонного коэффициента по формуле

$$\rho_{расч} = K \rho_{изм} ,$$

где  $\rho_{изм}$  - измеренное значение удельного сопротивления грунта;  
 $K$  - сезонный коэффициент, значения которого приведены в табл. I.I.

Таблица I.I.

Назначение заземления	Повышенная влажность	Средняя влажность	Пониженная влажность
Рабочее и защитное	5,0	2,7	1,9
Грозозащиты	2,6	1,4	-

3. Вычисляется расчетное значение сопротивления горизонтальных электродов по формуле

$$R_r = \frac{\rho_{\text{расч.г.}}}{2\pi L_r} \ln \frac{L_r^2}{0,5bt} ,$$

где  $L_r$  - длина горизонтальных электродов;  $b$  - ширина полосы, применяемой для горизонтальных электродов;  $t$  - глубина погружения горизонтальных электродов;  $\rho_{\text{расч.г.}}$  - расчетное удельное сопротивление горизонтальных электродов, определяемое с учетом сезонного коэффициента.

4. Вычисляется расчетное сопротивление заземлителя с учетом совместного действия вертикальных и горизонтальных электродов по выражению, полученному путем суммирования проводимостей обоих типов заземлителей, работающих параллельно

$$R = \frac{R_v R_r}{R_v K_{\text{и.в.з.м}} + R_r K_{\text{и.г.з.м}} n} ,$$

где  $K_{\text{и.в.з.м}}$  и  $K_{\text{и.г.з.м}}$  - коэффициенты использования заземлителей, определяемые из таблиц с учетом количества вертикальных электродов и отношения расстояний между ними к их длине;  $n$  - число вертикальных электродов.



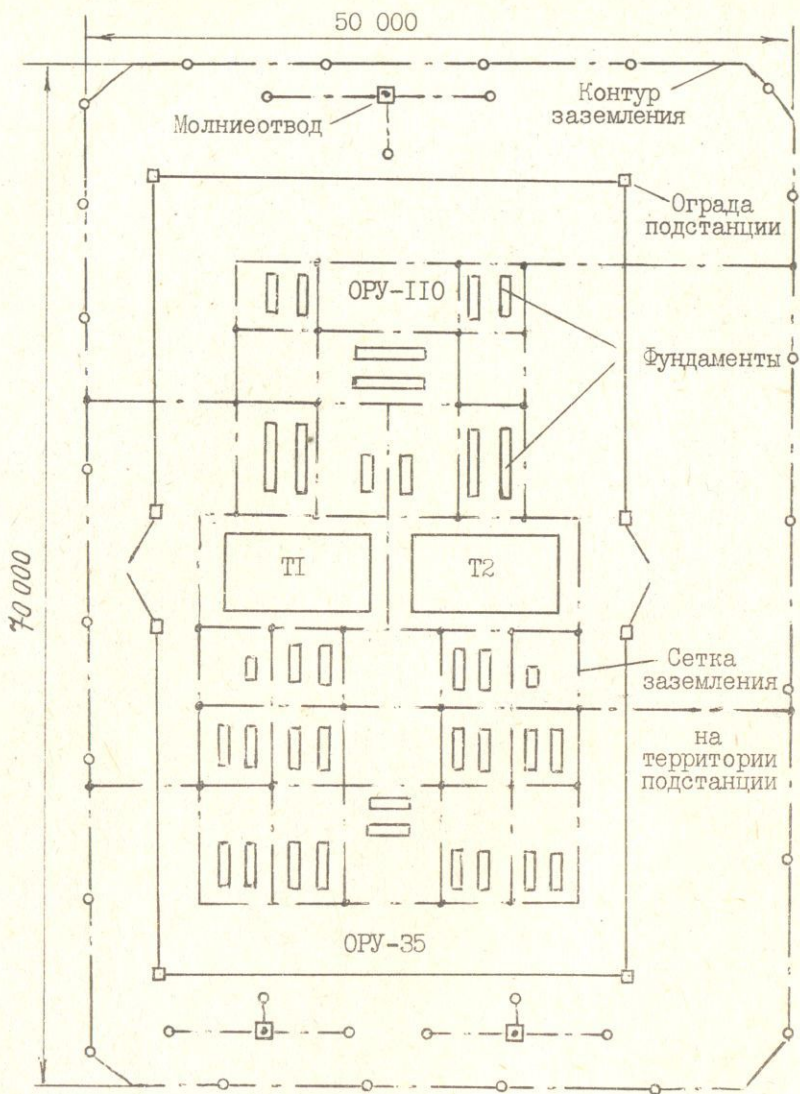


Рис. I.13 План расположения заземления на подстанции

## I.5. Конструкция аппаратов и устройств защиты от перенапряжений

Распределительные устройства подстанций надежно защищаются от прямых ударов молнии молниеотводами. Линии электропередачи с такой же степенью надежности защитить невозможно из-за их большой длины. Волны импульсов перенапряжений, возникающие на линиях при ударах молнии, доходят до подстанций и могут представлять опасность для изоляции электрооборудования. Поэтому наряду с защитой от прямых ударов применяется защита от набегающих с линии волн импульсов перенапряжений. Для предупреждения перекрытия или пробоя изоляции параллельно ей присоединяется искровой промежуток (ИП), вольт-секундная характеристика которого должна лежать ниже вольт-секундной характеристики защищаемой изоляции. Тогда набегание импульса перенапряжения вызывает пробой ИП с последующим резким падением (срезом) напряжения на ИП и на изоляции. Вслед за импульсным током через искровой промежуток по ионизированному пути протекает сопровождающий ток промышленной частоты. Если установка работает с заземленной нейтралью или пробой ИП произошел в двух или трех фазах, то дуга сопровождающего тока может не погаснуть, и импульсный пробой перейдет в устойчивое короткое замыкание, приводящее к отключению установки. Чтобы избежать этого, следует обеспечить гашение дуги сопровождающего тока через ИП. Устройства, обеспечивающие защиту изоляции от перенапряжений и гашение дуги сопровождающего тока в течение времени, меньшего времени действия релейной защиты, называются защитными разрядниками.

По способу гашения дуги сопровождающего тока различают два типа разрядников — трубчатые и вентильные.

**Т р у б ч а т ы е   р а з р я д н и к и .** Основу трубчатого разрядника составляет трубка из газогенерирующего материала 1. Один конец трубки (рис. I.14) заглушен металлической крышкой, на которой закреплен внутренний стержневой электрод 2. На открытом конце трубки расположен другой электрод в виде кольца 3. Промежуток  $S_1$  между стержневым и кольцевым электродами называется внутренним, или дугогасящим промежутком. Трубка отделяется от провода фазы внешним искровым промежутком  $S_2$ , чтобы газогенерирующий материал трубки не разрушался под действием токов утечки.

При возникновении импульса грозового перенапряжения оба про-

межутка пробиваются, и импульсный ток молнии стекает в землю. После окончания импульса тока молнии через разрядник продолжает проходить сопровождающий ток промышленной частоты, и искровой разряд переходит в дуговой. Под действием высокой температуры канала дуги в трубке происходит интенсивное выделение газа, и давление сильно увеличивается. Газы устремляются к открытому концу трубки и создают продольное дутье, в результате чего дуга интенсивно охлаждается и гаснет при первом же прохождении тока через нулевое значение. При работе разрядника слышен звук, напоминающий выстрел, и из трубки выбрасываются раскаленные газы.

Вольт-секундная характеристика трубчатого разрядника зависит от длин внешнего и внутреннего промежутков и имеет вид, характерный для промежутков с резконеоднородным полем. Величина внешнего искрового промежутка выбирается по условиям защиты изоляции и может регулироваться в определенных пределах. Величина внутреннего искрового промежутка устанавливается в соответствии с дугогасящими свойствами разрядника и регулированию не подлежит.

Для успешного гашения дуги сопровождающего тока необходимо достаточно интенсивное генерирование газа в трубке, которое зависит от величины проходящего тока, поэтому имеется нижний предел

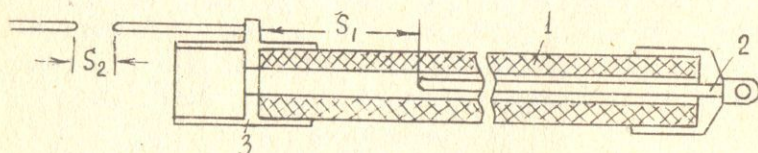


Рис. I.14. Трубчатый разрядник типа РТВ (винипластовый)

токов, которые надежно отключаются трубчатым разрядником. При больших токах интенсивное газовыделение может привести к чрезмерному повышению давления и разрушению трубки. Пределы токов, которые надежно отключает разрядник, указываются в его паспорте. Например, РТВ-110/2...10 — это винипластовый разрядник, предназначенный для работы в сети с номинальным напряжением 110 кВ и

устанавливаемый в точках сети, где величина проходящего через него тока короткого замыкания 2...10 кА.

Трубчатые разрядники характеризуются следующими параметрами: номинальным и наибольшим допустимым напряжением; пределами отключаемых токов промышленной частоты; импульсными пробивными напряжениями при стандартной волне I, 5/40 мкс отрицательной и положительной полярности; пробивным напряжением при промышленной частоте; импульсной пропускной способностью.

**Вентильные разрядники.** Вентильные разрядники являются основным аппаратом для защиты изоляции электрооборудования электростанции и подстанции от перенапряжений. В соответствии с защитными характеристиками вентильных разрядников (защитным уровнем) устанавливаются уровни изоляции (нормированные испытательные напряжения полной и срезанной импульсных волн и напряжения промышленной частоты) трансформаторов и другого электрооборудования станций и подстанций.

Согласование уровня изоляции (электрической прочности) с перенапряжениями, которые могут возникнуть при эксплуатации, с учетом защитного уровня вентильных разрядников называется координацией изоляции.

Под защитным уровнем вентильного разрядника понимают амплитуду напряжения, возникающего на зажимах разрядника при присоединении к нему определенного допустимого импульса тока, называемого током координации, в виде падения напряжения на рабочем нелинейном сопротивлении, называемого остаточным напряжением.

Основными элементами вентильного разрядника являются (рис. I.15) многократный искровой промежуток ИП и соединенный последовательно с ним резистор НРС с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

Искровые промежутки вентильных разрядников бывают трех типов в зависимости от способа гашения дуги сопровождающего тока промышленной частоты.

Основу нелинейного резистора составляет порошок электротехнического карборунда  $S_iC$ . На поверхности зерен карборунда имеется запорный слой из окиси кремния  $S_iO_2$ . Удельное сопротивление собственно зерен карборунда невелико - около 10 Ом·м. Сопротивление запорного слоя нелинейно зависит от напряженности электрического поля. При малых напряженностях (при малых напряжениях на резисторе) удельное сопротивление запорного слоя состав-

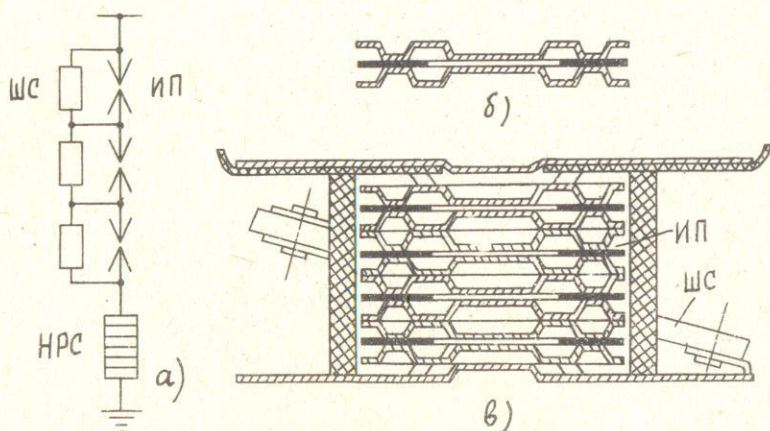


Рис. I.15. Схема электрических соединений вентильного разрядника (а); единственный искровой промежуток (б); комплект из четырех единичных искровых промежутков (в)

ляет  $10^4 \dots 10^6$  Ом·м, все напряжение ложится на запорный слой, и он определяет значение сопротивления нелинейного резистора. При повышении напряженности поля сопротивление запорного слоя резко падает, и значение сопротивления нелинейного резистора начинает определяться собственно карборундом.

Свойство материала резко менять свое сопротивление в зависимости от величины приложенного напряжения, обеспечивая пропускание очень больших токов при высоких напряжениях, называют вентильным. Отсюда и название аппарата – вентильный разрядник. При воздействии на вентильный разрядник импульса грозового перенапряжения пробивается искровой промежуток, и сопротивление нелинейного резистора резко уменьшается. Через разрядник проходит импульсный ток молнии, создавший падение напряжения на нелинейном резисторе – оставшееся напряжение. После окончания процесса ограничения перенапряжения через разрядник продолжает проходить

сопровождающий ток промышленной частоты. Сопротивление нелинейного резистора при рабочем напряжении резко возрастает, сопровождающий ток существенно уменьшается, и при переходе его через нулевое значение дуга в искровом промежутке гаснет. Наибольшее напряжение промышленной частоты, при котором надежно обрывается сопровождающий ток, называется напряжением гашения  $U_{\text{гаш}}$ , а соответствующий ток — током гашения. Гашение сопровождающего тока может осуществляться в условиях однофазного замыкания на землю, поэтому в качестве напряжения гашения применяется значение напряжения на неповрежденных фазах при однофазном замыкании на землю. Дугогасящие свойства искрового промежутка характеризуются коэффициентом гашения  $K_{\text{гаш}} = U_{\text{пр}} / \sqrt{2} U_{\text{гаш}}$ , а защитное действие нелинейного резистора — коэффициентом защиты

$$K_{\text{защ}} = U_{\text{ост}} / \sqrt{2} U_{\text{гаш}},$$

где  $U_{\text{пр}}$  — пробивное напряжение искрового промежутка при 50 Гц. Основное значение для грозозащитных разрядников имеет снижение коэффициента защиты  $K_{\text{защ}}$ , что может быть достигнуто двумя способами.

Первый способ — получение более пологой вольт-амперной характеристики уже использован и не открывает реальных перспектив.

Второй способ — увеличение тока гашения за счет улучшения дугогасящих свойств искрового промежутка позволил создать вентильные разрядники новых типов.

Требования к характеристикам вентильных разрядников устанавливает ГОСТ 16357-70, согласно которому разрядники всех классов напряжений разделены на четыре группы.

I — разрядники серии РВТ и РВРД обладают наилучшими защитными свойствами и имеют наименьшие значения остаточного напряжения;

II — разрядники серии РВМ и РВМГ имеют искровые промежутки с магнитным гашением дуги;

III — разрядники серии РВС напряжением до 220 кВ имеет простейшие искровые промежутки с естественным гашением дуги около холодных электродов;

IV — разрядники серии РВН и РВО имеют такие же искровые промежутки, как разрядники III группы, а номинальное напряжение 6...10 кВ.

Условие защиты изоляции от перенапряжений для всех серий разрядников обеспечивается, если оставшееся напряжение и близкое к нему по значению импульсное пробивное напряжение искрового промежутка на 25...30 % ниже разрядного (пробивного) напряжения защищаемой изоляции. Следовательно, чем ниже оставшееся напряжение разрядника, тем надежнее он будет защищать изоляцию.

Разрядники серии РВП и РВО. Единичный искровой промежуток разрядников этой серии состоит из двух латунных электродов, разделенных миканитовой шайбой (рис. I.15б). Комплект искровых промежутков разрядников серии РВП на напряжение 3, 6 и 10 кВ состоит соответственно из 4, 7 и 11 единичных промежутков. Общий вид разрядника серии РВП-6 показан на рис. I.16. Основные элементы — многократный искровой промежуток ИП и последовательный резистор НРС — размещены в фарфоровой крышке и сжаты спиральной пружиной. Внутренняя полость фарфоровой крышки герметизируется прокладками из озоностойкой резины. К токоведущему проводу разрядник подсоединяется болтом в верхней части, к заземлению — шпилькой, расположенной в центре основания.

Нелинейный последовательный резистор разрядников серии РВП и РВО набирается из вилитовых дисков (вилит — запеченная смесь карборунда с жидким стеклом). Плоскости, которыми соприкасаются диски, для лучшего контакта металлизуются алюминием, а боковые поверхности вилитовых дисков для предотвращения пути тока утечки покрываются изолирующей обмазкой. Сопротивление последовательного резистора каждого разрядника подбирается так, чтобы падение напряжения при протекании импульсного тока 5 000 А не превышало нормируемого значения оставшегося напряжения, а сопровождающий ток промышленной частоты ограничивался до 80 ... 100 А.

Разрядники серии РВС также состоят из простейшего многократного искрового промежутка и последовательного нелинейного резистора. Группа из четырех единичных искровых промежутков помещается в фарфоровый цилиндр (рис. I.15), закрытый двумя крышками с пружинящими контактами, и образует стандартный комплект промежутков. Комплект из четырех единичных искровых промежутков шунтируется двумя полукольцевыми сопротивлениями, соединенными последовательно. Шунтирующие сопротивления также изготовлены на основе карборунда и имеют нелинейную вольт-амперную характеристику с коэффициентом вентильности  $\alpha = 0,35...0,45$

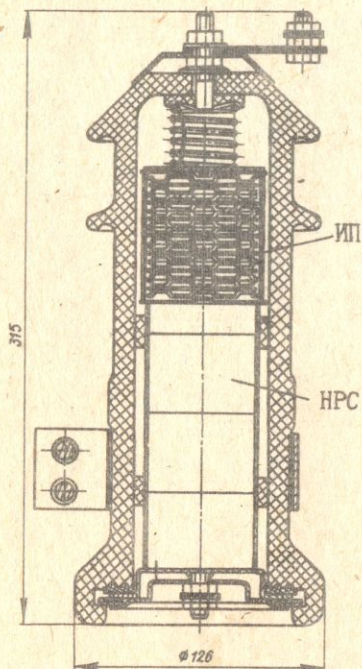


Рис. I.16. Общий вид вентильного разрядника серии RVC-6

стандартных элементов: RVC-15, RVC-20, RVC-30, RVC-33 и RVC-35. Разрядник на более высокие номинальные напряжения собирается из определенного числа стандартных элементов.

Разрядники серии RVM. В этих разрядниках применены искровые промежутки с магнитным гашением дуги. Электрическая дуга горит между concentрически расположенными электродами: кольцевым 1 и дисковым 2 (рис. I.17), которые образуют единственный искровой промежуток. Сопровождающий ток промышленной частоты проходит через постоянный магнит 3 на электрод единичного промежутка 1, затем через дугу на электрод 2 и постоянный магнит 4. В результате взаимодействия магнитного поля сопровож-

при токах 60...600 мкА. Шунтирующие сопротивления необходимы для равномерного распределения напряжения промышленной частоты по искровым промежуткам разрядника. Искровой промежуток разрядника в электрическом отношении представляет собой емкостную схему, аналогичную гирлянде изоляторов. Последовательные нелинейные резисторы вентильных разрядников серии RVC набираются из вилтовых дисков диаметром 100 и высотой 60 или 20 мм. Сопротивление последовательного резистора подбирается так, чтобы падение напряжения при протекании импульсных токов 10 000 А не превышало нормируемого значения оставшегося напряжения, а сопровождающий ток промышленной частоты был ограничен до 80 А.

Вентильные разрядники серии RVC выпускаются в виде пяти



дающего тока с магнитным полем постоянных магнитов дуга вращается по кольцевому промежутку между электродами. За один полупериод промышленной частоты дуга совершает несколько десятков оборотов, интенсивно охлаждается и гаснет при переходе тока через нулевое значение.

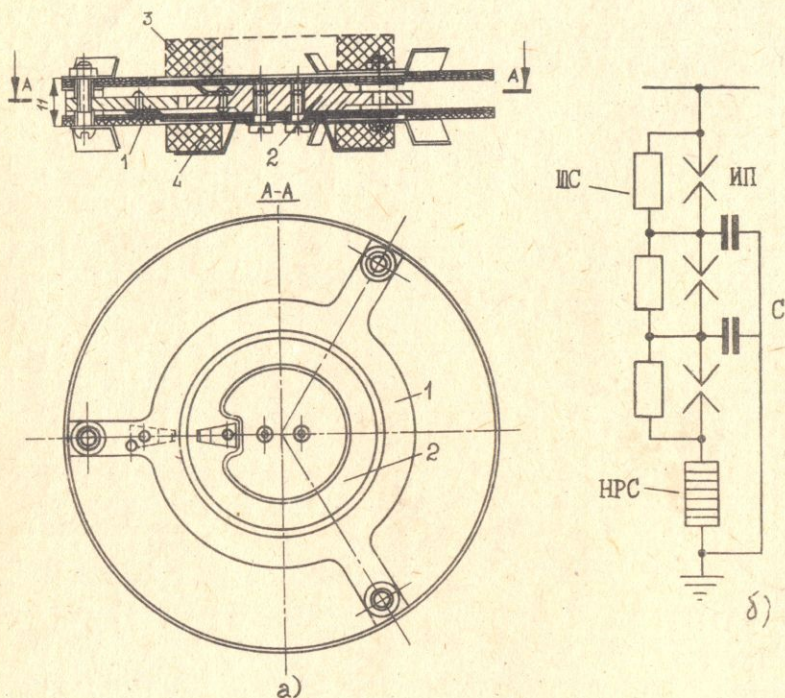


Рис. I.17. Конструкция единичного искрового промежутка с магнитным гашением дуги (а); схема вентильного разрядника РВМ (б)

Разрядники серии РВМ на номинальные напряжения 3...35 кВ предназначены для защиты от перенапряжений вращающихся электрических машин, которые имеют ослабленную изоляцию по сравнению с другим электрооборудованием.

Они имеют сниженные разрядные напряжения, и их искровые промежутки на номинальные напряжения 3, 6 и 10 кВ состоят соответственно из 3, 6 и 9 единичных искровых промежутков, разделенных на три равные группы. Электрическая схема соединения групп искровых промежутков показана на рис. I.17 б. Для равномерного распределения напряжения промышленной частоты и внутренних перенапряжений по единичным промежуткам каждая группа шунтирована нелинейным резистором ШС. Для неравномерного распределения импульсных напряжений по искровым промежуткам и снижения их разрядного импульсного напряжения первая и вторая группы искровых промежутков (считая от земли) шунтируются конденсаторами С. Снижение импульсных разрядных напряжений приводит к уменьшению коэффициента импульса разрядников РВМ до 0,6...0,5, что существенно повышает надежность защиты изоляции вращающихся электрических машин.

Разрядники серии РВМГ предназначены для защиты от грозových и кратковременных внутренних перенапряжений. На высокие номинальные напряжения они комплектуются из стандартных элементов РВМГ-33. Разрез одного элемента показан на рис. I.18. Каждый элемент состоит из блока искровых промежутков ИП и последовательного резистора НРС.

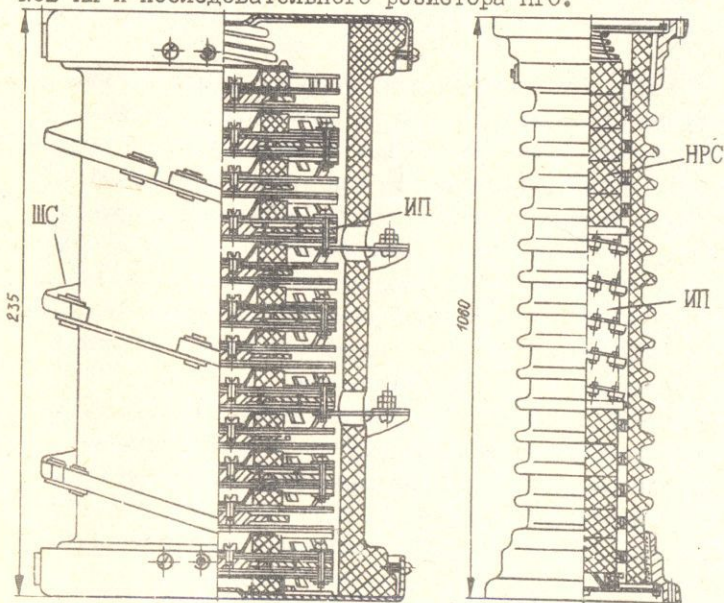


Рис. I.18. Блок искровых промежутков разрядника серии РВМГ (а), общий вид типового элемента (б)

Блок искровых промежутков элемента РВМГ-33 состоит из 20 единичных искровых промежутков с вращающейся дугой (рис. I.18 а). Каждый единичный искровой промежуток чередуется с постоянным магнитом из бариевого феррита. Каждые четыре искровых промежутка шунтируются тремя нелинейными высокоомными резисторами. Искровые промежутки помещаются внутри фарфорового цилиндра. Шунтирующие резисторы располагаются по спирали вокруг внешней поверхности фарфорового цилиндра, на дне которого находится влагопоглотитель.

Последовательный резистор элемента собирается из виловых дисков диаметром 130 и высотой 60 мм. Электрические характеристики вентильных разрядников серии РВМГ приведены в [ I, 6, 10 ] .

Разрядники серии РВМГ комбинированные, отдельные элементы их соединяются по специальной схеме (рис. I.19 а). Предназначены для защиты изоляции электрооборудования 330...500 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. При срабатывании разрядника от внутренних перенапряжений пробиваются искровые промежутки основных элементов ОЭ. Ток, проходящий через разрядник, ограничивается нелинейными последовательными резисторами основных ОЭ и вентильных ВЭ элементов и не превышает 1500 А. В этом режиме искровые промежутки основных элементов надежно гасят дугу сопровождающего тока при напряжении на разряднике до  $1,6 U_{\phi}$  (напряжение гашения).

При срабатывании разрядника от атмосферных перенапряжений в первый момент также пробиваются искровые промежутки основных элементов, и ток проходит через нелинейные последовательные резисторы основных и вентильных элементов. Но как только проходящий импульсный ток станет равным примерно 2000 А, падение напряжения на последовательных резисторах вентильных элементов ВЭ оказывается достаточным для пробоя искровых промежутков искровых элементов ИЭ. Они пробиваются, и последовательный резистор вентильного элемента шунтируется. Ток молнии проходит через основные и искровые элементы, а напряжение на разряднике снижается.

Вольт-амперная характеристика разрядника показана на рис. I.19 б. Она состоит из двух частей. Первая часть соответствует режиму его работы при внутренних перенапряжениях, когда ток проходит по основным и вентильным элементам, а вторая — при грозových перенапряжениях, когда вводятся в работу искровые элементы, которые выводят из работы (шунтируют) вентильные элементы.

Последовательные резисторы собираются из термитовых дисков диаметром 70 и высотой 20 и 30 мм, которые обладают большей пропускной способностью по току. Основные рабочие элементы состоят из пяти блоков искровых промежутков и двух блоков последовательных резисторов, помещенных в герметическую фарфоровую катушку. Каждый блок искровых промежутков состоит из четырех единичных искровых промежутков с магнитным гашением дуги, шунтированных нелинейным резистором.

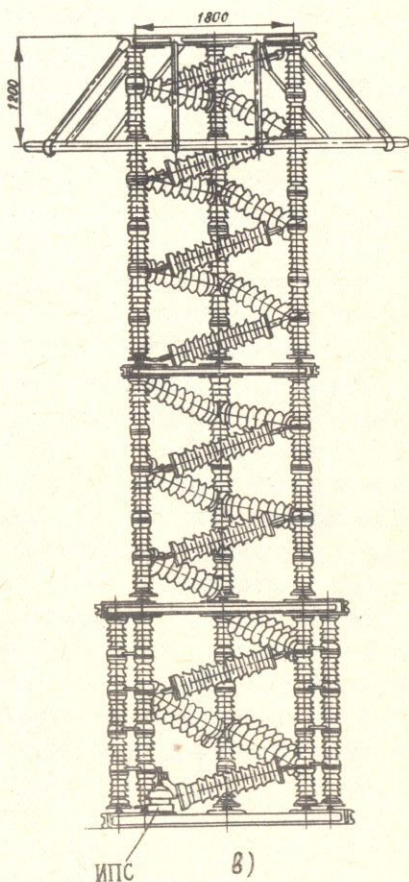
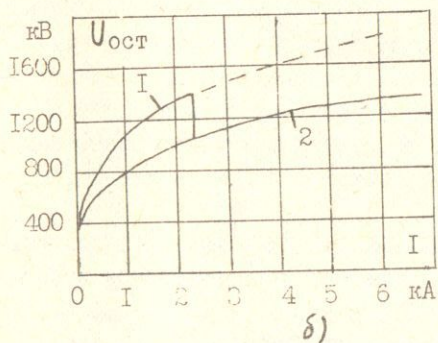
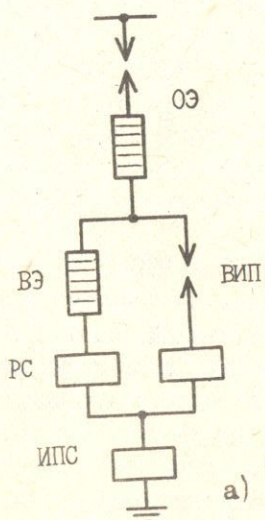


Рис. 1.19 Электрическая схема разрядника РВМК (а); вольт-амперная характеристика (б); общий вид (в)

Разрядники серии РВТ и РВРД. Разрядники серии РВТ имеют лучшие характеристики, чем разрядники, выпускаемые до сих пор. В разрядниках серии РВТ применены искровые промежутки с растягивающейся дугой, принцип действия которых показан на рис. 1.20 б. Два электрода 1 располагаются между стенками дутогасительной камеры 2 в магнитном поле  $NS$ , созданном согласно включенными катушками КМ. В таком поле на дугу действует сила  $F$ , направление которой определяется правилом "левой руки". Под действием этой силы дуга перемещается и растягивается между перегородками 3, стремясь занять конечное положение по краям камеры, охлаждается и гаснет. При растяжении дуга увеличивает свое сопротивление и тем самым ограничивает сопровождающий ток. Поэтому такой искровой промежуток обладает токоограничивающим свойством и повышенной дутогасящей способностью, что позволяет уменьшить сопротивление нелинейного резистора, снизить остающееся напряжение.

Электрическая схема разрядников серии РВТ-3, РВТ-6 и РВТ-10 показана на рис. 1.20 а. Последовательно с искровыми промежутками на схеме показаны катушки магнитного дугтя КМ, параллельно которым включены обходные искровые промежутки ОИП, защищающие изоляцию катушек КМ. Параллельно искровым промежуткам включены шунтирующие сопротивления ШС. Для снижения коэффициента импульса параллельно нижним группам искровых промежутков включены конденсаторы С, как у разрядников серии РЕМ, что необходимо для разрядников, применяемых для защиты вращающихся электрических машин. При появлении импульса перенапряжения на разряднике пробиваются обходные ОИП и основные ИП искровые промежутки. По пути пробоя импульсный ток стекает в землю. После прекращения импульсного тока дуга сопровождающего тока промышленной частоты в ОИП гаснет, и сопровождающий ток течет через катушку КМ, возбуждая магнитное поле, под действием которого дуга искрового промежутка ИП растягивается и гаснет.

Разрядники серии РВТ на напряжение 110 кВ и выше комплектуются из типовых элементов, имеющих одинаковое конструктивное исполнение. Общий вид разрядников серии РВТ показан на рис. 1.20 в.

Разрядники серии РВРД аналогичны разрядникам РВТ, однако конструктивно несколько отличаются. У разрядников серии РВРД магнитное поле, действующее на дугу, создается постоянными магнитами из феррита вместо катушек, примененных у разрядников РВТ. Дутога-

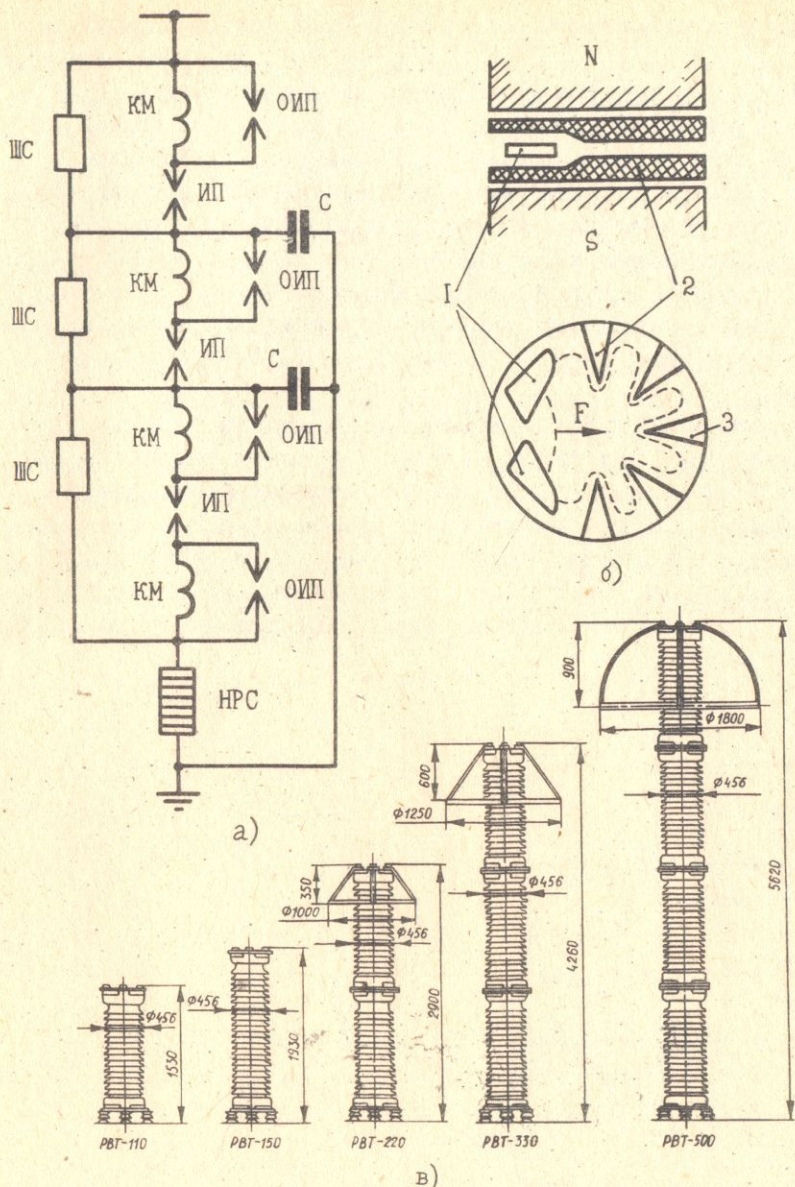


Рис. 1.20. Схема разрядников серии РВТ - 10 (а); единственный искровой промежуток с растягивающей дугой (б); общий вид разрядников серии РВТ (в)

сящие камеры изготавливаются из пористой дугостойкой керамики.

Нелинейные ограничители перенапряжений. В нелинейных ограничителях перенапряжений (ОПН) применяются резисторы, изготавливаемые на основе окиси цинка. От резисторов, применяемых в вентильных разрядниках и изготавливаемых на основе карборунда, они отличаются значительно большей нелинейностью. Вследствие этого при рабочем напряжении через резисторы проходит ничтожно малый ток, что позволяет исключить искровой промежуток и подключать ОПН непосредственно к сети. ОПН обеспечивают возможность глубокого ограничения напряжения, имеют малые габариты, их можно использовать в качестве опорных изоляторов.

Недостатком ОПН является возможность нарушения теплового баланса резистора и выхода его из строя при длительном прохождении тока более 1 мА. В связи с этим для ОПН устанавливаются предельные напряжения, которые они могут выдерживать в течение определенного времени. Промышленность выпускает ОПН на номинальные напряжения 110 кВ и выше. Электрические характеристики ОПН приведены в [6, 10], а схемы электрических соединений показаны на рис. 1.21.

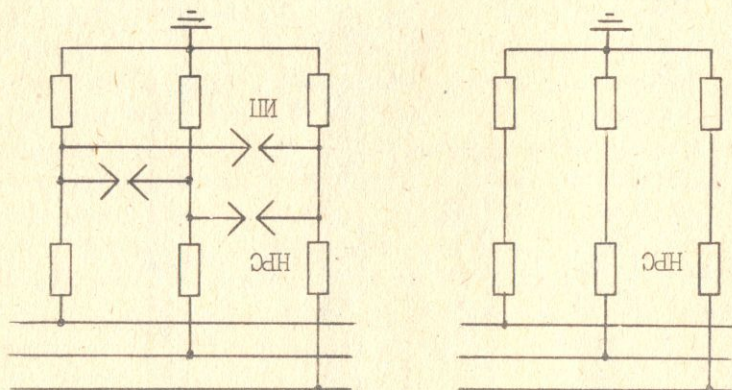


Рис. 1.21. Схемы включения ОПН

Регистраторы срабатывания разряд-

ников. Сведения о срабатывании разрядников при грозовых и внутренних перенапряжениях фиксируются с помощью регистраторов срабатывания, устанавливаемых последовательно с заземлением разрядника (рис. I.19 а). Для разрядников серии РВЦ, РВС, РВМ, РВМГ применяются регистраторы срабатывания типа РВР и РР, а для разрядников серии РВМК – регистраторы типа РР.

Принцип действия регистратора типа РВР состоит в следующем. Вентильный разрядник соединен с землей через НС регистратора (рис. I.22 а), по которому протекают токи проводимости шунтирующих сопротивлений разрядника. При срабатывании разрядника импульс тока молнии создает на сопротивлении НС падение напряжения от 2 до 2,6 кВ, вызывающее пробой искрового промежутка регистратора и перегорание плавкой вставки  $F$ , что приводит к повороту барабана счетчика под действием пружины. Возникающий при перегорании плавкой вставки разрыв цепи шунтируется пробоем второго искрового промежутка регистратора, включенного параллельно плавкой вставке. После девяти срабатываний регистратора, когда в смотровом окне будет виден красный штрих, необходимо произвести замену сгоревших плавких вставок.

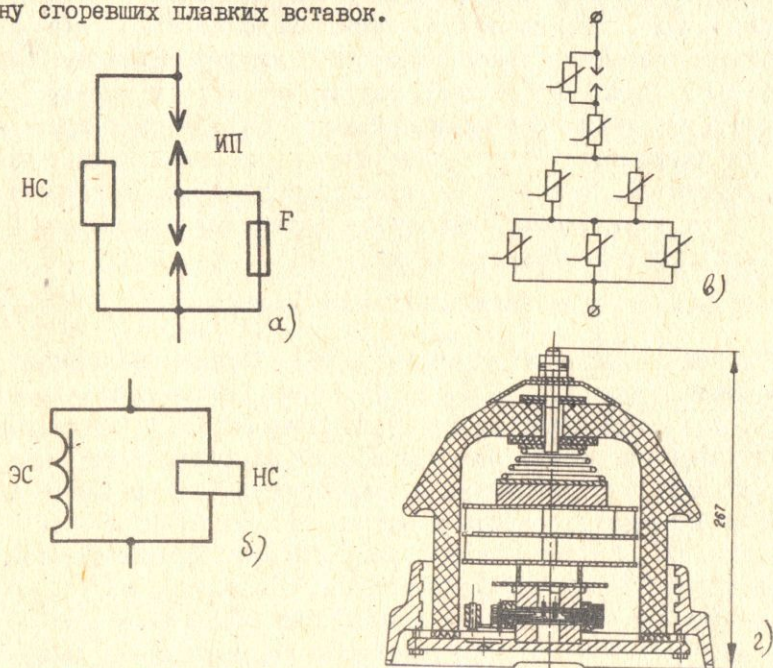


Рис. I.22. Схема электрических соединений: регистратора типа РВР (а); типа РР (б); имитатора пропускной способности разрядника типа РВМК (в) и общий вид имитатора (г)



Регистратор срабатывания типа РР (рис. I.22 б) представляет собой электромагнитный счетчик (ЭС) с параллельно соединенным нелинейным карборундовым сопротивлением (НС). Принцип действия регистратора типа РР основан на срабатывании электромагнитного счетчика при протекании по его обмотке сопровождающего тока 50 Гц.

При срабатывании разрядника импульсный ток молнии в основном протекает через карборундовое сопротивление НС и не вызывает срабатывания регистратора, а сопровождающий ток протекает через обмотку счетчика и вызывает его срабатывание.

**И м и т а т о р п р о п у с к н о й с п о с о б н о с т и .**  
Соединение вентильного разрядника серии РВМЖ с заземлителем выполняется через имитатор пропускной способности (ИПС), который контролирует работу последовательных нелинейных резисторов разрядника.

Электрическая схема и общий вид имитатора пропускной способности показаны на рис. I.22 в и г. В фарфоровом кожухе размещены искровой промежуток, шунтированный нелинейным высокоомным сопротивлением, и шесть тервитовых дисков из той же партии, которой укомплектован данный разрядник. Последовательно с искровым промежутком включен сначала один диск, затем два параллельно соединенных диска и далее три, также соединенных параллельно. По мере срабатывания разрядника диски имитатора расходуют пропускную способность не в одинаковой степени. Первым расходует пропускную способность и будет пробит одиночный диск, через который протекает полный ток разрядника. Затем пробьется один из двух параллельных дисков, и, наконец, один из трех параллельных дисков. В случае пробоя одного из трех параллельных дисков пропускная способность разрядника считается израсходованной.

#### I.6. Грозозащита линий электропередачи

Воздушная линия электропередачи (ЛЭП) ежегодно испытывает большое число прямых ударов молнии на каждые 100 км длины. Главную опасность для линии представляет прямой удар молнии в фазные провода с последующим перекрытием изоляции от возникающих при этом перенапряжений. После окончания импульса тока молнии на месте перекрытия остается проводящий канал не успевшего деионизироваться газа, по которому под действием рабочего напряжения может продолжаться течь ток промышленной частоты. Поэтому большая часть грозовых замыканий сопровождается дальнейшим развитием аварии, что требует отключения линии на длительный срок с нару-

нением нормального электроснабжения потребителей.

Для повышения надежности электроснабжения потребителей на ЛЭП осуществляется ряд грозозащитных мероприятий:

1. Защита от прямых ударов молнии в фазные провода.
2. Защита от обратных перекрытий с металлоконструкций опоры и заземления на токоведущие фазные провода.
3. Защита от перехода импульсного перекрытия в силовую дугу.
4. Защита от повреждения изоляции линии (гирлянд изоляторов).
5. Обеспечение бесперебойности электроснабжения.

**Защита от прямых ударов молнии.**  
При прямом ударе молнии в провод ЛЭП перенапряжения, возникающие на проводах, в большинстве случаев намного превышают импульсную прочность изоляции линии. Поэтому в первую очередь важно защитить провода от прямых ударов молнии. Для этого над проводами подвешиваются грозозащитные тросы с малыми углами защиты  $\alpha = 15...35^\circ$  на опоре (рис. I.23). При наличии тросов большинство ударов молнии попадает в них, и ток молнии через заземление опоры отводится в землю. Вероятность прорыва молнии на фазные провода существенно снижается.

**Защита от обратных перекрытий.**  
При ударе молнии в вершину опоры на ней возникает высокое напряжение, как сумма активного падения напряжения на сопротивлении заземления и индуктивного падения напряжения на индуктивности опоры. Поэтому возникает опасность обратного перекрытия изоляции с опоры, находящейся под высоким потенциалом, на токоведущий провод, оказывающийся под более низким потенциалом. Для уменьшения вероятности обратного перекрытия заземление опор стремятся выполнить с достаточно малым импульсным сопротивлением.

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ-76) заземление опор ЛЭП определяется требованиями грозозащиты линий. Сопротивление заземлителя опор, измеренное при 50 Гц и отсоединенном тросе, в течение грозового сезона не должно превышать значений, приведенных в табл. I.2.

Таблица I.2

Удельное сопротивление грунта, Ом·м	Сопротивление заземлителя			
	до 100	Более 100 и до 500	Более 500 и до 1000	Более 1000
Ом	10	15	20	30

Для линий с металлическими и железобетонными опорами, проходящих в местах с удельным сопротивлением грунта  $\rho = 300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , допустимые сопротивления заземлителя могут быть обеспечены использованием железобетонных подожников опор, которые являются естественными заземлителями.

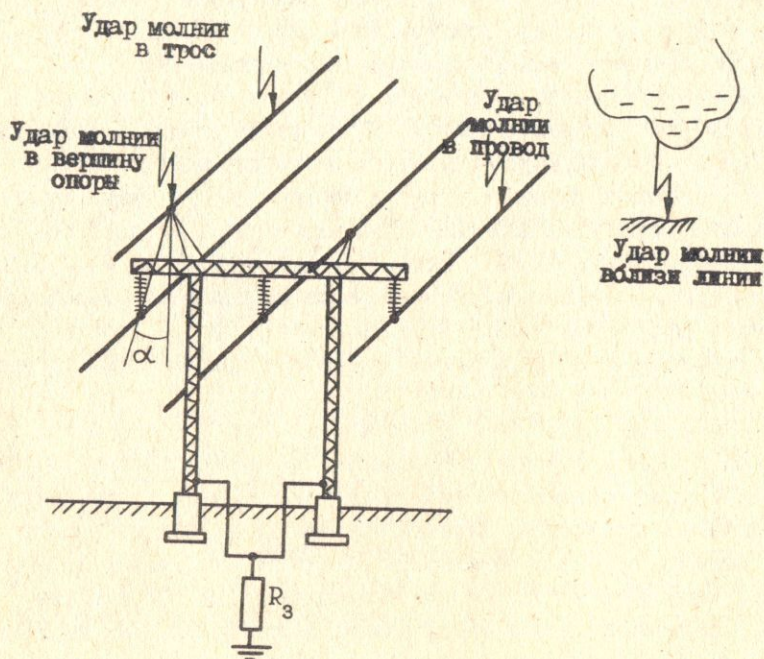


Рис. 1.23 Расчетные случаи грозового поражения линии с тросами

Если подожник опоры не обеспечивает нормированного значения сопротивления заземления опоры в данном грунте, то необходимо дополнительное устройство искусственного заземлителя.

Для линий на деревянных опорах с тросами или защитными разрядниками нормированная величина сопротивления заземлителя опор должна обеспечиваться искусственным заземлителем. Для расчета

сопротивления заземлителя одиночного стержневого молниеотвода или опоры ЛЭП можно использовать следующие формулы [6]:

сопротивление вертикальной трубы или стержня

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left[ \frac{4l(2t-l)}{d(4t+l)} \right],$$

горизонтальной полосы

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{1,5}{\sqrt{bt}},$$

железобетонного фундамента опоры

$$R = 1,7 \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{4t}{b},$$

где  $l$  — длина трубы или полосы;  $t$  — глубина погружения полосы, нижнего конца вертикального электрода или фундамента;  $b$  — ширина полосы или фундамента;  $d$  — диаметр трубы или стержня. Если заземлитель состоит из  $n$  труб или полос, то его импульсное сопротивление

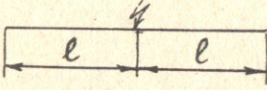

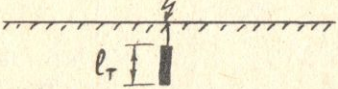
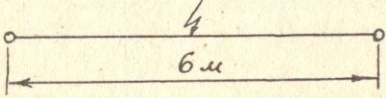
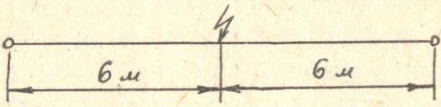
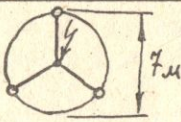
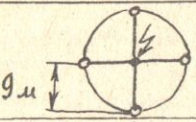
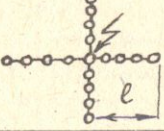
$$R_n = \frac{\alpha_n R}{K_n n},$$

где  $K_n$  — импульсный коэффициент использования заземлителя, учитывающий ухудшение условий растекания тока молнии вследствие взаимного экранирования электродов,  $\alpha_n$  — импульсный коэффициент.

В табл. I.3 приведены различные варианты конструктивного выполнения заземлителей, обеспечивающих при минимальных затратах металла импульсное сопротивление 10 Ом при токе молнии 100 кА в грунтах с удельным сопротивлением  $\rho = 100 \dots 650 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  [13].

Защита от перехода импульсного перекрытия в силовую дугу. В ряде случаев подвеска тросов и устройство заземления опор с малым сопротивлением экономически нецелесообразны. Поэтому для менее ответственных линий, в частности, для ЛЭП 3...35 кВ, а также для ЛЭП 110 кВ на деревянных опорах возможно отказаться от применения грозозащитных тросов. Однако надо стремиться к тому, чтобы как можно меньшая часть перекрытий изоляции ЛЭП при прямых ударах молнии переходила в силовую электри-

Таблица I.3

Конструкция заземлителей с импульсным сопротивлением 10 Ом при токе молнии 100 кА		$\rho_{\text{ом}} \cdot \text{м}$
Полосовые заземлители		
	$l = 5 \text{ м}$	150
	$l = 10 \text{ м}$	200
	$l = 10 \text{ м}$	300
	$l = 20 \text{ м}$	380
Заземлители из труб ( $l_{\text{T}} = 2 \text{ м}$ ) и полос		
		100
		150
		200
		270
		300
	$l = 20 \text{ м}$ $n = 17 \text{ шт}$	650

ческую дугу. Вероятность перехода импульсного перекрытия в силовую дугу при ударе молнии в линию зависит от амплитуды рабочего напряжения, его фазы в момент удара молнии, скорости восстановления электрической прочности изоляции после протекания импульсного тока молнии, его величины и длительности, а также от других случайных факторов, например, от атмосферных условий.

В сети с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через дугогасящую катушку ток однофазного замыкания на землю существенно меньше, чем в сети с эффективно заземленной нейтралью. Это ведет к значительному снижению вероятности образования устойчивой дуги. Однако остается опасность междуфазного перекрытия. Для снижения вероятности перехода импульсного перекрытия в дугу во всех случаях целесообразно увеличивать длину пути перекрытия.

Защита линии от повреждения изоляции. При грозовых перенапряжениях возникает опасность повреждения деревянных опор и гирь тнд изоляторов. Для предотвращения расщепления стойки при ударе молнии в деревянную опору применяются металлические бандажи.

Защита от повреждения изоляторов гирлянд обеспечивается прежде всего их правильным конструированием. Чтобы изоляторы в гирлянде не повреждались током молнии, электрическая прочность тела изолятора должна превышать напряжение перекрытия по поверхности. При наружном перекрытии энергия дуги рассеивается в основном в воздухе. Оплавление поверхности изолятора дугой предотвращается быстрым ( $0,1 \dots 0,2$  с) отключением тока короткого замыкания.

Обеспечение бесперебойности электроснабжения. При грозовых перекрытиях изоляции линии важно обеспечить минимальную вероятность перерыва электроснабжения потребителей. Для этого используются различные виды автоматического повторного включения (АПВ) линий. Быстродействующая релейная защита осуществляет отключение пораженной линии с последующим быстрым ее включением. При повторном включении линии в большинстве случаев восстанавливается электроснабжение потребителя. Для увеличения надежности электроснабжения применяется также кольцевание и резервирование линий.

Грозозащита ЛЭП различных классов напряжения. Высокую надежность грозозащиты воздушных ЛЭП обеспечивают следующие мероприятия: подвеска грозозащитных тросов с достаточно малыми углами защиты; снижение импульсного сопротив-

ления заземления опор; повышение импульсной прочности изоляции линий и снижение вероятности установления силовой дуги; применение изолированной нейтрали или дугогасящей катушки; использование АПВ. Отметим особенности обеспечения надежности грозозащиты с использованием перечисленных мероприятий для ЛЭП различных классов напряжения.

ЛЭП напряжением 220 кВ и выше, как правило, сооружаются на металлических или железобетонных опорах. При этом основным средством грозозащиты являются тросы, располагаемые над фазными проводами, с достаточно малым углом защиты  $\alpha = 20...30^\circ$ . Для эффективного отвода тока молнии в землю и предотвращения обратных перекрытий изоляции опоры линии снабжаются специальными заземлителями, снижающими импульсное сопротивление заземления до  $R_{\text{и}} = 10...20 \text{ Ом}$ . Более высокие значения сопротивления заземления допускаются лишь для линий, расположенных в районах с высоким удельным сопротивлением грунта  $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . В грунтах с  $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  желательно применять эффективные глубинные заземлители. Дополнительным средством повышения надежности электроснабжения является применение АПВ.

Линии на 110 и 150 кВ на железобетонных опорах в большинстве случаев также защищаются по всей длине тросами с углом защиты  $\alpha = 20...30^\circ$ . Однако нередко линии 110 кВ эксплуатируются без тросовой защиты. К таким случаям относятся: прохождение линий в районах со слабой интенсивностью грозовой деятельности  $T < 20 \text{ ч}$ ; высокое удельное сопротивление грунта, не позволяющее обеспечить малое сопротивление заземления опор и эффективную работу троса; расположение линий в особо гололедных районах, где большие механические нагрузки на трос при обледенении создают опасность обрыва троса; наличие на трассе линии районов с агрессивными уносами промышленных предприятий, вызывающими быструю коррозию тросов и опасность их обрыва; расположение линии в горной местности, где разряды с большими токами молнии редко достигают проводов линии, ориентируясь преимущественно на возвышающиеся поблизости горные массивы.

Линии 110 и 150 кВ на деревянных опорах не требуют подвески тросов. Достаточная грозоупорность этих линий обеспечивается высокой импульсной прочностью линейной изоляции и малым градиентом напряжения вдоль пути перекрытия. Если на линии некоторые опоры

выполнены металлическими или железобетонными (например, угловые или анкерные), то на них должны устанавливаться трубчатые разрядники. Важным средством повышения надежности грозозащиты линий 110 и 150 кВ на деревянных опорах является применение АПВ.

Линии 35 кВ на металлических и деревянных опорах также не имеют тросовой защиты и защищаются от грозовых воздействий с помощью дугогасящей катушки и изолированной нейтрали. Кроме того, линии 35 кВ на деревянных опорах имеют более высокую надежность грозозащиты за счет использования высокой импульсной прочности дерева.

Линии 3...20 кВ как на металлических, так и на деревянных опорах не имеют тросовой защиты и защищаются от грозовых воздействий с помощью дугогасящей катушки или изолированной нейтрали и АПВ. На опорах с ослабленной изоляцией или повышенной вероятностью грозового поражения устанавливаются защитные искровые промежутки или трубчатые разрядники. Линии с номинальным напряжением 3...35 кВ реже подвергаются прямым ударам молнии из-за их относительно небольшой высоты и протяженности. В то же время приходится наблюдать отключение этих линий вследствие воздействия индуктированных перенапряжений.

#### 1.7. Грозозащита подстанций объектов электроснабжения

Надежность защиты понижающих подстанций от грозовых перенапряжений должна быть значительно выше надежности грозозащиты линий, так как внутренняя изоляция подстанционного оборудования, и прежде всего силовых трансформаторов, имеет меньшие запасы электрической прочности по сравнению с изоляцией линий и не обладает свойством самовосстанавливаться после пробоя и погасания дуги.

Для обеспечения достаточно высокой надежности работы подстанции при грозовых воздействиях выполняется следующий комплекс защитных мероприятий:

1. Защита оборудования и проводов открытого распределительного устройства (ОРУ) и закрытого (ЗРУ) от прямых ударов молнии.

2. Защита от обратных перекрытий с молниеотводов на токоведущие фазные провода ОРУ.



3. Защита от волн импульсов перенапряжений, набегających с линии.

4. Защита подходов линий к подстанции от прямых ударов молнии.

Защита от прямых ударов молнии. ОРУ подстанций защищает от прямых ударов молнии системой стержневых молниеотводов, охватывающих своими зонами защиты все оборудование подстанции. Установка молниеотводов непосредственно на конструкциях (порталах) ОРУ позволяет наиболее эффективно использовать их зону защиты, уменьшить затраты на их сооружение и сделать ОРУ более компактным. Однако протекание тока молнии по поддерживающим конструкциям создает опасность возникновения высокого потенциала на них и обратных перекрытий на токоведущие элементы ОРУ. В целях предотвращения обратных перекрытий на таких подстанциях разрабатываются специальные меры. Когда вероятность обратных перекрытий не удастся снизить до достаточно малой величины, устанавливают отдельно стоящие молниеотводы с обособленными заземлителями.

Необходимость сооружения отдельно стоящих молниеотводов определяется номинальным напряжением изоляции ОРУ, удельным сопротивлением грунта и величиной импульсного сопротивления заземлителя конструкций ОРУ.

В ОРУ 220 кВ и выше при наличии заземления, удовлетворяющего требованиям безопасности, можно практически всегда устанавливать молниеотводы на порталах ОРУ, так как импульсная прочность изоляции этих классов напряжения имеет более высокий уровень. В этом случае необходимо, чтобы воздушные промежутки между заземленными конструкциями ОРУ, на которых установлены молниеотводы, и токоведущими частями подстанции были не меньше длины изолирующей части установленных гирлянд.

В ОРУ 110 и 150 кВ приходится устанавливать отдельно стоящие молниеотводы при удельных сопротивлениях грунта  $\rho = 2 \text{ кОм}\cdot\text{м}$ , а также при значениях  $\rho$  от 1 до 2  $\text{кОм}\cdot\text{м}$ , если площадь контура заземления подстанции менее 10 000  $\text{м}^2$ .

В ОРУ 35 кВ отдельно стоящие молниеотводы устанавливают при  $\rho = 750 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , а также при значениях  $\rho$  от 500 до 750  $\text{Ом}\cdot\text{м}$ , если площадь заземляющего контура менее 10 000  $\text{м}^2$ .

Нецелесообразно устанавливать стержневые молниеотводы на трансформаторных порталах, поскольку некоторая доля их потенциала при протекании тока молнии передается на бак трансформатора, и могут возникать обратные перекрытия с бака на обмотки, заземлен-

ные в других точках сети. При  $\rho = 350 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  такая опасность становится ощутимой, и ПУЭ в этом случае не допускают использования трансформаторных порталов для установки молниеотводов. На подстанциях с высшим напряжением 20 и 35 кВ устанавливать молниеотвод на трансформаторном портале разрешается при сопротивлении заземляющего устройства  $R_{з.и.} = 4 \text{ Ом}$  и выполнении ряда мероприятий по защите от обратных перекрытий.

### Защита от обратных перекрытий

Прямой удар молнии в молниеотвод или другую заземленную часть оборудования на подстанции приводит к появлению на ней импульса напряжения, амплитуда которого может быть подсчитана по формуле

$$U_0 = I_M R_{з.и.} + I'_M L_0,$$

где  $I_M$  и  $I'_M$  - амплитуда и крутизна тока молнии;  $R_{з.и.}$  - импульсное сопротивление заземления конструкции ОРУ;  $L_0$  - ее индуктивность.

Если высота молниеотвода  $h = 30 \text{ м}$ , а сопротивление заземления  $R_{з.и.} = 40 \text{ Ом}$ , то при средних значениях параметров тока молнии  $I_M = 20 \text{ кА}$  и  $I'_M = 10 \text{ кА/мкс}$  потенциал на его вершине  $U_0 = 980 \text{ кВ}$ . Поскольку средняя пробивная напряженность в воздухе составляет около  $500 \text{ кВ/м}$ , объекты, расположенные ближе двух метров от молниеотвода, могут быть повреждены при таких разрядах молнии вследствие обратных перекрытий с молниеотвода. Следовательно, чтобы предотвратить обратные перекрытия, необходимо снизить импульсное сопротивление заземления молниеотвода  $R_{з.и.}$  и удалить защищаемые объекты от молниеотвода на безопасное расстояние. В ПУЭ рекомендуется выдерживать расстояние между защищаемым оборудованием и молниеотводом по воздуху  $S_B$  в метрах, исходя из следующих соотношений:  $S_B > 0,12 R_{з.и.} - 0,1 h_x \geq 5 \text{ м}$ , где  $h_x$  - высота расположения объекта.

В земле расстояние между электродами обособленного заземлителя молниеотвода и заземляющим устройством ОРУ

$$S_3 = 0,2 R_{з.и.} \geq 3 \text{ м}.$$

Заземляющие проводники укладывают у стойки конструкции, на которой установлен молниеотвод, расходящимися в двух-трех направ-

лениях, чтобы ослабить экранирование и уменьшить коэффициент импульса заземлителя.

Для снижения импульсного сопротивления заземлителя молниеотвода на расстоянии не более 3...5 м от места его присоединения к заземлителю устанавливаются дополнительные заземляющие электроды. Такая мера обязательна в ОРУ 110 и 150 кВ, а также на подстанциях более высокого класса напряжения в случае установки молниеотвода на трансформаторном портале.

При установке молниеотвода в ячейке трансформатора обращают внимание на достаточное удаление между местами присоединения к заземляющему контуру молниеотвода и бака трансформатора. Согласно ПУЭ это расстояние должно быть не менее 15 м. Кроме того, рекомендуется приблизить точки подключения разрядников на стороне высокого напряжения и особенно на стороне низкого напряжения к вводам трансформатора. Эти меры направлены на предотвращение обратных перекрытий с бака трансформатора на обмотки, которые могут быть заземлены в другой точке и не участвовать в импульсном подъеме потенциала бака трансформатора при протекании тока молнии по его заземлителю.

Защита от волн, набегающих с линии и . Параметры волн импульсов перенапряжений, набегающих на подстанцию, зависят от вида поражения молнией ЛЭП. При ударе молнии в провод или при прорыве тросовой защиты линии обычно возникают полные импульсы напряжения, близкие по форме импульсам тока молнии. Если амплитуда тока молнии велика, то возможно перекрытие изоляции, тогда образуется срезанный импульс напряжения.

Распространяющийся по линии импульс напряжения деформируется и затухает. Основной причиной деформации и затухания являются импульсная корона и сопротивление земли, так как ток импульса замыкается через землю. Энергия, необходимая для образования чехла короны, отбирается на фронте импульса, в результате чего происходит удлинение (сглаживание) его фронта. Если импульс короткий или срезанный, то импульсная корона приводит не только к удлинению фронта, но и к понижению амплитуды. При полных импульсах напряжения влияние импульсной короны сказывается в большей степени на удлинении фронта и в значительно меньшей степени на снижении амплитуды. Снижение амплитуды происходит в основном за счет активных потерь при возврате тока по земле.

Уровень изоляции подстанционного оборудования ниже уровня

изоляции линии, что обусловлено экономическими соображениями. Поэтому набегающие импульсы напряжений представляют опасность для изоляции оборудования подстанции, и их максимальное значение должно быть ограничено.

Основным аппаратом защиты от набегающих импульсов напряжений является вентильный разрядник, у которого разрядное напряжение искрового промежутка и остающееся напряжение на нелинейном резисторе при токах координации не менее чем на 25% ниже гарантированной прочности защищаемой изоляции при полном импульсе.

Чтобы защита с помощью вентильных разрядников была эффективной, необходимо ограничить ток, проходящий через разрядник, величиной тока координации (от 5 до 14 кА в зависимости от номинального напряжения и типа разрядника) и крутизну импульса напряжения, набегающего на разрядник.

Чтобы ограничить ток, проходящий через вентильный разрядник, необходимо исключить прямые удары в провода линии вблизи подстанции. С этой целью участки линий длиной от 0,5 до 3 км, примыкающие к подстанциям (подходы), должны защищаться от прямых ударов молнии тросовыми молниеотводами. Если линия защищена тросами по всей длине, то на подходах особенно тщательно выполняются требования грозозащиты по отношению к сопротивлению заземления и углам защиты тросов. Такие подходы называются защищенными. Наличие защищенного подхода уменьшает вероятность прихода на подстанцию импульсов напряжений с большой крутизной.

Волны импульсных грозовых перенапряжений часто имеют длительность фронта 1...2 мкс. За это время волна успевает распространиться на 300...600 м, поэтому становится заметным различие напряжений в точках, отстоящих друг от друга по ходу волны всего на несколько десятков метров. Это не позволяет представить ошиновку ОРУ подстанции как один общий узел, куда подключено все оборудование. Оборудование, расположенное по ходу волны перед разрядником, может подвергаться перенапряжениям, превышающим напряжение на разряднике вследствие запаздывания волны, отраженной от сработавшего разрядника. А оборудование, расположенное позади разрядника, — вследствие отражения волн импульсов перенапряжений на тупиковых концах участков ошиновки.

Для обеспечения грозозащиты подстанций от проходящих по линиям волн грозозащитных перенапряжений необходимы

установка одного или нескольких трехфазных комплектов вентильных разрядников, или ОПН, у которых пробивное и остающееся напряжение ниже допустимого уровня перенапряжений на определенную величину, называемую интервалом координации  $\Delta U_K$  ;

защита подходов линий от прямых ударов молнии на определенной длине  $l_n$  , при которой обеспечивается достаточное сглаживание фронта набегающих волн и снижение тока в разрядниках;

выбор такого числа и места установки разрядников, чтобы расстояние между любым из защищаемых объектов и ближайшим к нему разрядником  $l_p$  не превышало безопасной величины, зависящей от схемы подстанции, длины защищенного подхода линии и интервала координации.

Выбор схемы грозозащиты подстанции сводится к нахождению оптимального, с точки зрения критериев грозозащиты, соотношения между указанными параметрами:

При установлении интервала координации следует учитывать, что уровень допустимых воздействий на изоляцию  $U_{доп}$  связан с величиной испытательного напряжения по ГОСТ 1516-76. Для силовых трансформаторов, в частности, принято, что при типичной форме импульсного воздействия уровень допустимых перенапряжений рассчитывается по формуле

$$U_{доп} = 1,1 (U_{исп.имп} - 0,5 U_{ном}) ,$$

где  $U_{исп.имп}$  — импульсное испытательное напряжение полной

волной стандартной формы;  $U_{ном}$  — действующее значение номинального напряжения. Сравнение допустимых уровней грозовых перенапряжений для силовых трансформаторов и защитных характеристик вентильных разрядников показывает, что интервал координации в существующих сетях составляет 23...40 %.

Число и расположение разрядников на подстанции первоначально принимается исходя из опыта создания аналогичных схем подстанций и из условия удобства их размещения на территории ОРУ. Впоследствии производится сопоставление вариантов. В ПУЭ приводятся оптимальные варианты схем защиты от грозовых перенапряжений в зависимости от схемы подстанции, типа опор на подходе к ОРУ, длины защищенного подхода, числа постоянно включенных линий.

Грозозащита подстанций различных классов напряжений. Линии с номинальным напряжением 330 кВ и выше защищаются тросами по всей длине, поэтому нет необходимости устанавливать разрядники в начале защищенного подхода. Для защиты реакторов, ограничивающих внутренние перенапряжения на концах линии, рядом с ними устанавливаются вентильные разрядники. Трубочатые разрядники на линиях этих классов не используются.

Вентильные разрядники устанавливаются без коммутационных аппаратов в цепи между разрядником и трансформатором (автотрансформатором, шунтирующим реактором) в случаях защиты

обмоток всех напряжений силовых трансформаторов, имеющих автотрансформаторную связь между собой;

обмоток трансформаторов напряжением 330 и 550 кВ;

обмоток 150 и 220 кВ трансформаторов, имеющих основной уровень изоляции по ГОСТ 1516-73;

шунтирующих реакторов 500 кВ.

Габариты ОРУ этих классов напряжения не позволяют обеспечить защиту одним разрядником несколько силовых трансформаторов и других аппаратов, поэтому устанавливаются разрядники около каждого трансформатора и на секциях сборных шин.

На подстанциях 35...220 кВ оборудование часто располагается компактно, и бывает достаточно установки разрядников на секциях сборных шин. На удаленных от шин трансформаторах необходимо ставить дополнительные разрядники. Наибольшие допустимые расстояния от вентильных разрядников до защищаемого оборудования приведены в ПУЭ [9]. Пример схемы грозозащиты подстанции 110/6-10 кВ показан на рис. 1.24.

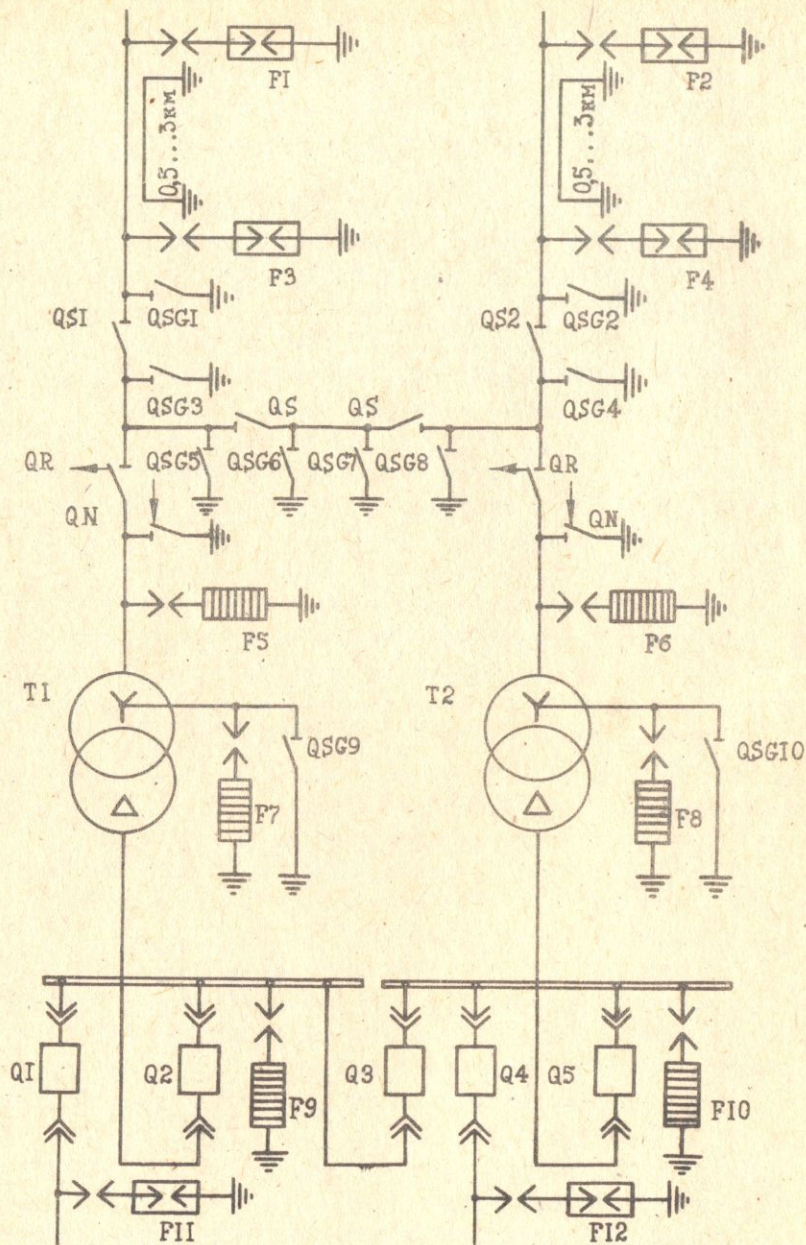


Рис. 1.24. Схема защиты подстанции КТЩБ-110/10 от набегающих с линии волн перенапряжений

Некоторые особенности имеет грозозащита подстанций средних классов напряжения с кабелями. К ним относятся подстанции 3...10 кВ (в отдельных случаях 35 кВ) без электрических машин. Ввод напряжения на такие подстанции обычно осуществляется с помощью кабельных вставок, поскольку большое число воздушных линий 6...10 кВ к подстанции подвести очень сложно. Для повышения надежности грозозащиты в месте соединения воздушной линии с кабельной устанавливается трубчатый разрядник для ограничения проходящей волны. Оболочка кабеля соединяется с заземлением разрядника. Оптимальная длина кабельной вставки 100...150 м. Для защиты кабельной муфты в конце кабеля устанавливается вентильный разрядник. В случае применения токоограничивающих реакторов они также защищаются вентильными разрядниками.

Грозозащита подстанций на ответвлениях и заходах. Защита подстанций напряжением 35...110 кВ с трансформаторами до 40 000 кВ·А, присоединяемых к ответвлениям протяженностью менее требуемой длины защищенного подхода от действующих линий с деревянными, металлическими или железобетонными опорами без троса, выполняется по упрощенным схемам (рис. I.25). При этом основными являются вентильные разрядники FV3, устанавливаемые на подстанции на расстоянии не более 10 м от силового трансформатора. Дополнительно для защиты от прямых ударов молнии устанавливаются тросовые молниеотводы подхода к подстанции на всей длине ответвления. При длине ответвления менее 150 м следует дополнительно защищать тросовыми или стержневыми молниеотводами по одному пролету действующей линии в обе стороны от ответвления. Кроме того, в начале подхода устанавливаются два комплекта трубчатых разрядников FV с сопротивлением заземления каждого разрядника не более 10 Ом. Трубчатые разрядники устанавливаются на деревянных опорах: FV2 - на первой опоре с тросом со стороны линии или на границе участка, защищаемого стержневыми молниеотводами; FV1 - на незащищенном участке линии на расстоянии 150...200 м от FV2.

Аналогично выполняется грозозащита подстанций, присоединяемых с помощью заходов протяженностью меньше требуемой длины (рис. I.25б). Однако трансформаторы должны быть защищены вентильными разрядниками серии РВМГ (II группа по ГОСТ I6357-70).

Защита подстанций, на которых расстояния между вентильными разрядниками и трансформатором превышает 10 м, выполняется в



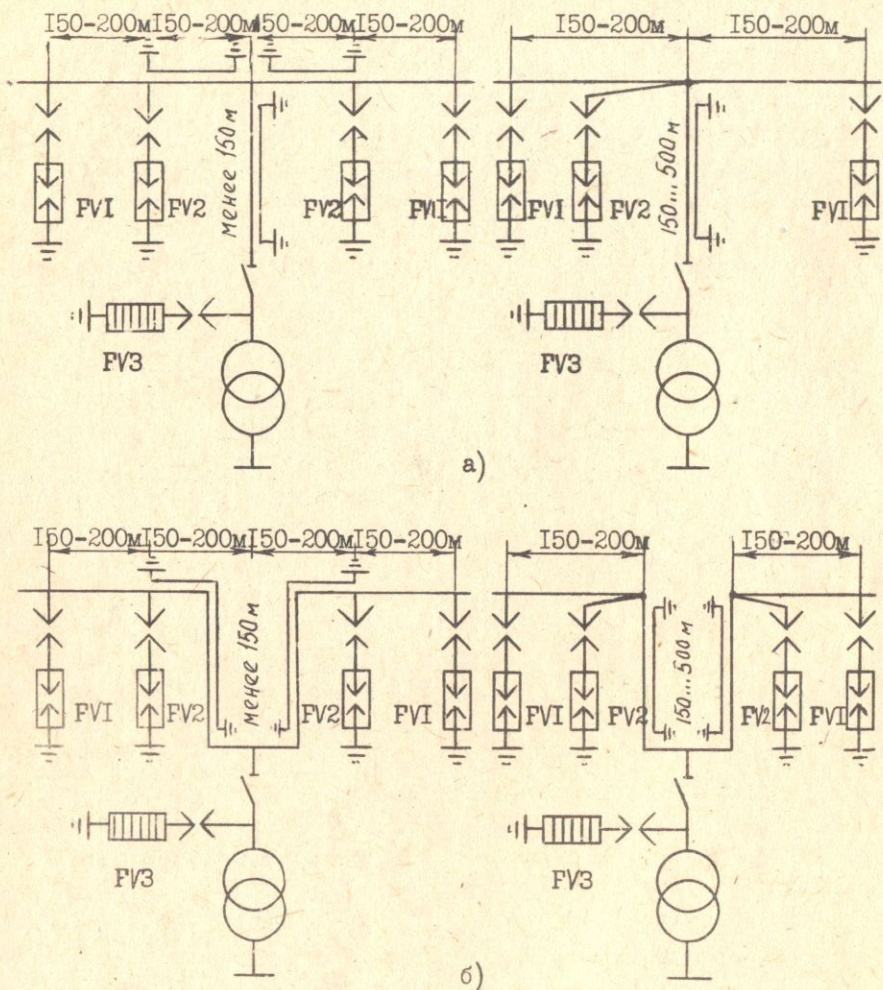


Рис. I.25. Схемы защиты от грозных перенапряжений подстанций, присоединенных к воздушным линиям с помощью ответвлений (а); и заходов (б)

соответствии с основными требованиями грозозащиты согласно ПУЭ-76. Выполнение грозозащиты подстанций, присоединяемых к вновь сооружаемым воздушным линиям, по упрощенным схемам не допускается.

В районах с удельным сопротивлением земли 1000 Ом и более сопротивление заземления трубчатых разрядников  $FV1$  и  $FV2$  напряжением 35 и 110 кВ, устанавливаемых для защиты подстанций, которые подсоединяются к действующим линиям на ответвлениях и заходах, может быть от 10 до 30 Ом. Заземляющий контур  $FV2$  должен быть соединен с заземляющим контуром подстанции протяженным заземлителем.

Линейные разъединители, применяемые на воздушной линии напряжением 35 и 110 кВ у места ответвления, должны быть смонтированы на тех опорах, где установлены трубчатые разрядники  $FV2$ .

### 1.8. Грозозащита вращающихся электрических машин

Изоляция машин имеет высокую начальную электрическую прочность, превышающую в 8...10 раз максимально допустимое рабочее напряжение, при этом коэффициент импульса  $K_{\text{и}}$  для этой изоляции составляет 1,3...1,6. В процессе эксплуатации электрическая прочность изоляции сильно снижается из-за вибрации, короны, механических воздействий при коротких замыканиях, испарения летучих веществ и пересыхания (в micaлентной изоляции) либо температурных напряжений и растрескиваний (в термореактивной изоляции). При этом значение коэффициента импульса падает до 0,7...1,0 и ниже [5].

Периодически при ремонтах (но не реже одного раза в два года) изоляция должна испытываться переменным напряжением  $1,5...1,7 U_{\text{н}}$  или постоянным напряжением  $(2,5...3,0) U_{\text{н}}$ , где  $U_{\text{н}}$  - номинальное напряжение машины. В соответствии с этим принято, что для главной изоляции обмоток электрических машин допустимая амплитуда грозовых перенапряжений

В табл. 1.4 для сравнения приведены допустимые импульсные напряжения на главной изоляции вращающихся электрических машин, трансформаторов и оставшееся напряжение вентильных разрядников для классов напряжения 3, 6 и 10 кВ (для вращающихся электрических машин  $U_{\text{н}} = 3,15, 6,3$  и  $10,5$  кВ).

Таблица I,4,

Нормированные параметры	Номинальное напряжение, кВ		
	3	6	10
Допустимое импульсное напряжение на главной изоляции, кВ :			
трансформаторов	44	60	80
вращающихся машин	7,6	15,2	25,2
Остаточное напряжение разрядников при токе 3 кА, кВ :			
серии РВМ	9	17	28
серии РВТ, РВРД	7	14	23,5

Как видно из табл. I.4, только у разрядников I группы серии РВТ и РВРД остаточное напряжение при токе не более 3 кА ниже, чем допустимое импульсное напряжение на изоляции машин, но интервал между этими напряжениями получается малым. Ввиду трудности координации импульсной прочности изоляции вращающихся машин с характеристиками вентильных разрядников согласно ПУЭ-76 допускается непосредственное присоединение (без трансформаторов) к воздушным линиям генераторов мощностью до 50 000 кВ·А. Воздушные линии с деревянными опорами допускается присоединять к генераторам и синхронным компенсаторам мощностью до 25 000 кВ·А.

Помимо ограничения напряжения на вводе машины, схема грозозащиты должна предусматривать ограничение напряжения на изолированной нейтрали и на продольной изоляции путем снижения крутизны падающей волны.

Грозозащита вращающихся машин, присоединенных непосредственно к воздушным линиям, осуществляется вентильными разрядниками серии РВТ, РВРД при условии ограничения тока, проходящего через разрядник (желательно до 1,5 кА). Это необходимо для увеличения координационного интервала между оставшимся напряжением разрядника и допустимым напряжением на главной изоляции машины. С этой целью применяются различные схемы защиты воздушных подходов и способы связи обмотки машины с воздушной линией (реактор, кабельная вставка). Кроме того, для ограничения крутизны фронта волны параллельно разряднику включается конденса-

тор емкостью 0,25...0,5 мкФ.

Схемы защиты вращающихся машин от грозových перенапряжений приведены на рис. I.26. Вентильные разрядники I группы и емкости не менее 0,5 мкФ на фазу следует устанавливать для защиты генераторов (синхронных компенсаторов) мощностью более 15 000 кВ·А на присоединении каждого генератора (синхронного компенсатора); мощностью 15 000 кВ·А и менее на шинах (секциях шин) генераторного напряжения; электродвигателей мощностью более 3000 кВт на шинах распределительного устройства.

Если вращающиеся машины и воздушные линии электростанции или подстанции присоединены к общим шинам, то подходы этих линий должны быть защищены от грозových воздействий с соблюдением следующих требований.

Подход воздушной линии с железобетонными опорами должен быть защищен тросом на протяжении не менее 300 м; в начале подхода должен быть установлен комплект трубчатых разрядников (рис. I.26а).

Опоры защищенного тросом подхода линии должны иметь деревянные траверсы с расстоянием не менее 1 м по дереву от точки крепления гирлянды изоляторов до стойки опоры. Провода линии следует подвешивать на гирляндах изоляторов, соответствующих классу напряжения 35 кВ. Сопротивление заземления трубчатых разрядников не должно превышать 5 Ом, а сопротивление заземления тросовых опор — 10 Ом.

При наличии реактора на присоединении воздушной линии подход на длине 100...150 м должен быть защищен от прямых ударов молнии тросовым молниеотводом (рис. I.26б). В начале подхода, защищенного тросовым молниеотводом, должен быть установлен комплект трубчатых разрядников, а у реактора — комплект вентильных разрядников IV группы. Сопротивление заземления трубчатого разрядника должно быть не более 10 Ом.

Наиболее надежные схемы грозозащиты получаются при одновременном использовании кабельной вставки и реактора (рис. I.26в). Индуктивность реактора снижает крутизну напряжения на обмотке машины и повышает напряжение со стороны линии, способствуя своевременному срабатыванию разрядника FV2 и ограничению максимального значения волны, приходящей с линии. Если кабельная вставка длиной более 50 м, защита подхода от прямых ударов молнии не требуется. В месте присоединения линии к кабелю должен быть

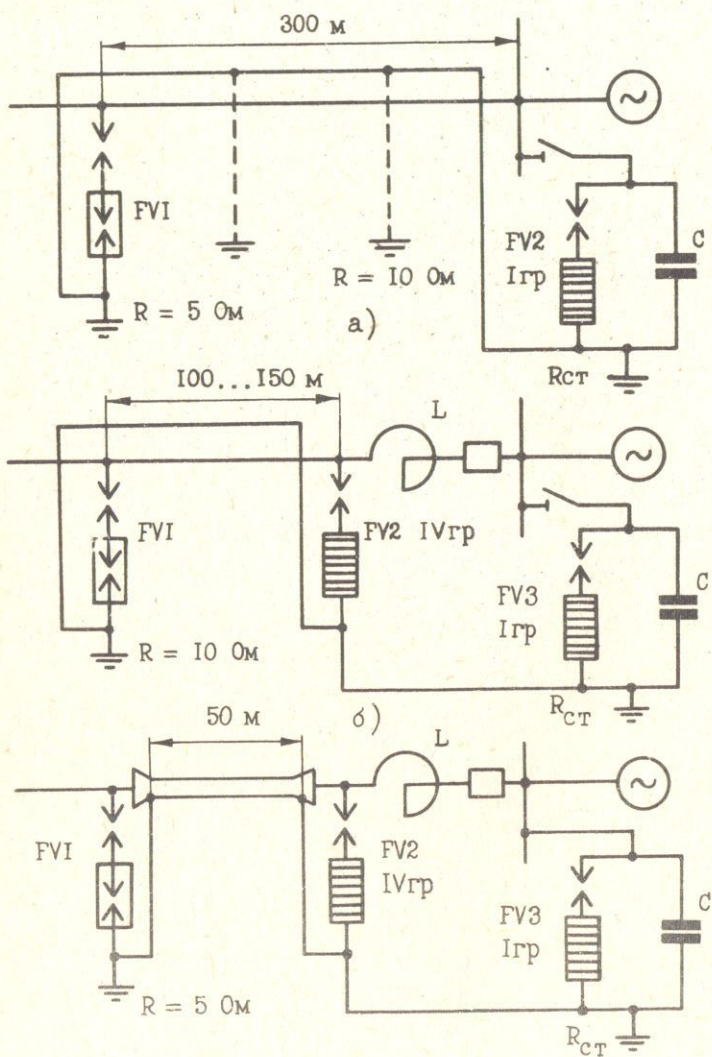


Рис. 1.26. Схемы защиты вращающихся электрических машин от грозových перенапряжений мощностью выше 3000 кВт

установлен комплект трубчатых разрядников с сопротивлением заземления не более 5 Ом, а перед реактором — комплект вентильных разрядников IV группы.

При применении открытых токопроводов (открытых шинных мостов и подвесных гибких токопроводов) для присоединения генератора (синхронного компенсатора) с трансформатором они должны входить в зону защиты молниеотводов подстанции или электростанции. Место присоединения молниеотводов к заземляющему устройству электростанции или подстанции должно быть удалено от места присоединения к нему заземляемых элементов токопровода, считая по полосам заземления, не менее чем на 20 м. Если открытые токопроводы не входят в зоны защиты молниеотводов ОРУ, то они должны быть защищены от прямых ударов молнии отдельно стоящими молниеотводами или тросами, подвешенными на отдельных опорах с защитным углом не более  $20^{\circ}$ . Заземление отдельно стоящих молниеотводов и тросовых опор должно выполняться обособленными заземлителями, не имеющими соединения с заземляющим устройством опор токопровода, или путем присоединения к заземлению распределительного устройства в точках, удаленных от места присоединения к нему заземляемых элементов токопровода на расстояние не менее 20 м.

Присоединение воздушных линий к электродвигателям мощностью до 3000 кВт, имеющим надежное резервирование, допускается при отсутствии защиты подходов от прямых ударов молнии. При этом требуется установка на подходе воздушной линии двух комплектов трубчатых разрядников на расстояниях 150 и 250 м от шин подстанции (рис. I.27).

При наличии кабельной вставки любой длины непосредственно перед кабелем должен быть установлен вентильный разрядник IV группы. Заземляющий зажим разрядника должен быть присоединен кратчайшим путем к металлическим оболочкам кабеля и заземлителю. У электродвигателя должны быть установлены вентильные разрядники I группы и защитные емкости по 0,5 мкФ на фазу (рис. I.27).

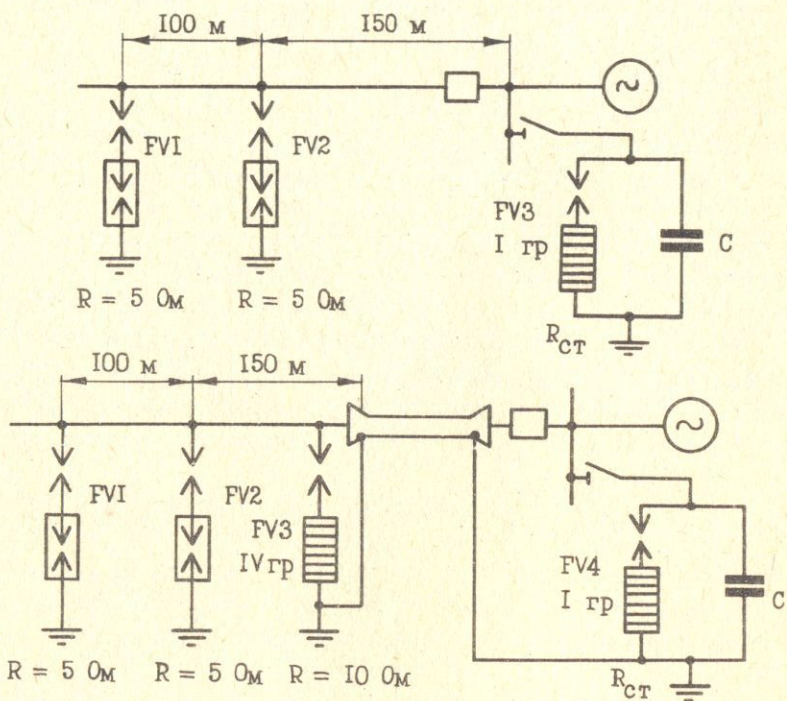


Рис. 1.27. Схемы защиты электродвигателей мощностью до 3000 кВт при подходе воздушной линии на деревянных опорах

## 2. Внутренние перенапряжения

### 2.1. Классификация внутренних перенапряжений

Перенапряжениями называются любые повышения напряжения в электрических системах выше длительно допустимых. Внутренние перенапряжения возникают в электрических системах в результате как оперативных коммутаций (включение и отключение ненагруженных линий, отключение ненагруженных трансформаторов и реакторов поперечной компенсации, отключение конденсаторных батарей), так и при аварийных коммутациях в результате действия релейной защиты или противоаварийной автоматики (отключение короткого замыкания, автоматическое повторное включение линий, внезапный сброс нагрузки и некоторые другие).

Всякая электрическая система имеет источники э.д.с. — генераторы, синхронные компенсаторы; элементы, способные накапливать энергию, — индуктивности и емкости как сосредоточенные (индуктивности генераторов, трансформаторов и реакторов, емкости конденсаторных батарей), так и распределенные (индуктивности и емкости линий); элементы, способные поглощать энергию, — активная нагрузка, сосредоточенные и распределенные сопротивления и проводимости системы.

Ввиду наличия в системе реактивных элементов (индуктивностей и емкостей) внутренние перенапряжения носят колебательный характер. Колебательные свойства электрической системы, способные вызвать появление перенапряжений, проявляются при нарушении энергетического баланса между генерируемой и поглощаемой энергией. Причиной нарушения баланса может явиться внезапное отключение элементов, способных поглощать энергию.

Рассмотрим в качестве примера упрощенную однофазную схему электрической системы (рис. 2.1 а). В этой схеме  $L_H$  — индуктивность источника;  $L_L$  и  $C_L$  — индуктивность и емкость линии;  $L_C$  — индуктивность приемной системы;  $Z_H = R_H + \omega L_H$  — комплексное сопротивление нагрузки. При замкнутом выключателе колебания в схеме демпфированы активным сопротивлением нагрузки. При разомкнутом выключателе  $Q_2$  схема содержит в основном только реактивные элементы, поэтому любое внезапное возмущение в этой схеме приведет к колебаниям напряжения на емкости



линии, т.е. к перенапряжениям.

Процесс коммутации в электрической системе, например, включение разомкнутой линии толчком, можно подразделить на несколько этапов (рис. 2.1 б). Допустим, включение линии произошло в начале координат. На первом этапе наблюдается переходный процесс продолжительностью несколько полупериодов промышленной частоты. Пока регуляторы возбуждения генераторов в силу инерционности не изменят возбуждение, э.д.с. их можно считать неизменной на протяжении первого и второго этапов.

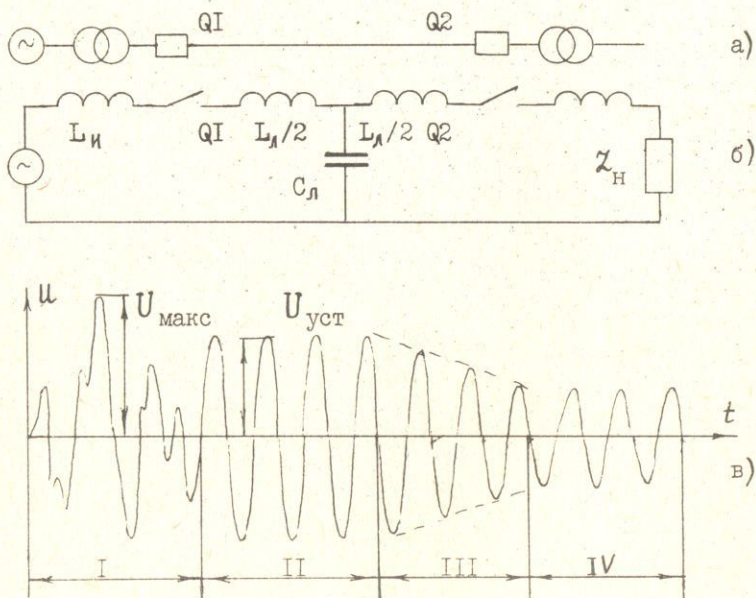


Рис. 2.1. Упрощенная схема замещения системы (а и б) и стадии коммутационного процесса (в).  
 I - переходный процесс; II - установившийся режим до начала работы регуляторов (вынужденная составляющая переходного процесса); III - работа регуляторов возбуждения; IV - новый установившийся режим работы

После затухания свободных колебаний наступает второй этап, который можно условно назвать установившимся режимом перенапряжений. На третьем этапе благодаря действию регуляторов установившееся перенапряжение постепенно уменьшается, пока не установится новый стационарный (рабочий) режим на четвертом этапе. Для надежной работы электрооборудования системы необходимо, чтобы возникающие перенапряжения в течение первых двух этапов процесса не превысили электрическую прочность изоляции.

При анализе внутренних перенапряжений отдельно рассматривают коммутационные перенапряжения; перенапряжения при однофазных дуговых замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью; феррорезонансные перенапряжения при неполнофазных режимах; и резонансные перенапряжения в системах сверхвысокого напряжения, обусловленные емкостным эффектом.

## 2.2. Коммутационные перенапряжения

Коммутационные перенапряжения можно разделить на ряд характерных групп.

Первая — перенапряжения при коммутациях, не осложненных неустойчивым горением дуги, в которую входят включение ненагруженной линии; успешное и неуспешное АПВ; одностороннее отключение короткого замыкания; разрыв электропередачи при выпадении из синхронизма; коммутация включения и отключения, заканчивающаяся неполнофазными режимами.

Вторая — перенапряжения при отключении ненагруженных линий, сопровождающиеся повторным зажиганием дуги в выключателе.

Третья — перенапряжения при отключении малых индуктивных токов (ненагруженных трансформаторов и шунтирующих реакторов), сопровождающиеся явлением среза тока.

Коммутационные перенапряжения сопровождаются сложным переходным процессом на первом этапе, который определяется следующими факторами: частотами и декрементами затухания свободных колебаний, в первую очередь первой собственной частотой и декрементом этой частоты; значением установившегося напряжения, зависящего от вида коммутации; начальными условиями, определяемыми характеристиками выключателя.

Важной характеристикой перенапряжений переходного процесса является ударный коэффициент  $K_{уд}$ . При заданных условиях (схема и ее параметры, вид коммутации, тип выключателя) ударный коэффициент представляет статистическую величину, т.е. значение ударного коэффициента зависит от многих факторов, которые изменяются от опыта к опыту.

Значение внутренних перенапряжений принято также определять их кратностью  $K_{пер}$  по отношению к наибольшему рабочему фазному напряжению

$$U_{пер} = K_{пер} U_{ф. \text{наиб. раб}} .$$

Кратность внутренних перенапряжений является произведением двух коэффициентов

$$K_{пер} = K_{уд} K_{у} .$$

где  $K_{уд}$  — ударный коэффициент, представляющий собой отношение максимального напряжения переходного процесса к устанавливаемому напряжению вынужденной составляющей переходного процесса;  $K_{у}$  — отношение устанавливающегося напряжения к наибольшему рабочему фазному напряжению.

Перенапряжения при включении линии и АПВ. Коммутационные перенапряжения при включении линии вызваны колебательным процессом, возникающим при переходе от начального к установившемуся напряжению на линии. Плановое включение ненагруженной линии обычно производится с одного конца, а после выполнения синхронизации — с другого. Большая кратность перенапряжения возникает при включении фаз первого выключателя. При плановом включении оперативный персонал стремится уменьшить ожидаемые перенапряжения путем соответствующей подготовки схемы, а именно: снижением возбуждения генераторов, уменьшением коэффициентов трансформации трансформаторов, предварительным включением реакторов поперечной компенсации. Установившееся напряжение в конце линии стремятся иметь не более допустимого напряжения при синхронизации  $U_y = (1,1 \dots 1,2) U_{ном}$ . Тогда в переходном процессе перенапряжение на конце линии может достигнуть  $2 U_y$ .

При автоматическом повторном включении установившееся напряжение в конце линии может превышать указанные выше значения, так как АПВ предшествует нормальному режиму передачи мощности,

при котором возбуждение генераторов и коэффициенты трансформации трансформаторов могут оказаться высокими. Кроме того, наличие остаточного заряда на неповрежденных фазах линии также увеличивает перенапряжения.

Пусть источник с э.д.с.  $\dot{e}(t) = E_M \sin(\omega t + \varphi)$  включается на линию с эквивалентной индуктивностью  $L_{\text{ЭК}}$  и емкостью  $C_{\text{ЭК}}$  (рис. 2.2 а). Напряжение в конце линии в такой схеме совпадает с напряжением на емкости  $C_{\text{ЭК}}$ , которое можно представить в виде суммы установившегося напряжения и свободной составляющей

$$u_2 = U_y + U_{\text{св}} = E_M \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \left[ \sin(\omega t + \varphi) - \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 \cos^2 \varphi} \times \right. \\ \left. \times e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \right], \quad (2.1.)$$

где  $\omega$  — промышленная частота;  $\omega_1 = 1/\sqrt{L_{\text{ЭК}} C_{\text{ЭК}}}$  — частота свободных колебаний;  $\delta = R/2L_{\text{ЭК}}$  — коэффициент затухания свободной составляющей;  $\varphi_1 = \arctg(\omega_1/\omega \operatorname{tg} \varphi)$ .

Максимальное перенапряжение на конце линии  $u_2$  определяется в основном углом включения  $\varphi$ , частотой собственных колебаний  $\omega_1$ , амплитудой свободных колебаний  $A$ , вычисляемой по формуле

$$A = E_M \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 \cos^2 \varphi} \quad (2.2.)$$

Из формулы (2.2) следует, что при  $\omega_1/\omega > 1$  (линии до 330 кВ) амплитуда свободных колебаний имеет наибольшее значение при углах включения, близких к  $90^\circ$  или  $270^\circ$ . При  $\omega_1/\omega < 1$  амплитуда свободных колебаний будет наибольшей (линии 500 кВ и выше), когда угол включения  $\varphi$  близок к  $0^\circ$  или  $180^\circ$ .

В качестве примера рассмотрим включение линии с  $\omega_1/\omega = 5$  при угле включения  $\varphi = 90^\circ$  (рис. 2.2 б). Сложение ординат установившегося напряжения 1 и свободной составляющей 2 дает кривую переходного процесса 3. Максимальное значение напряжения достигается в первый полупериод свободных колебаний, когда напряжение установившегося режима не успевает значительно измениться.

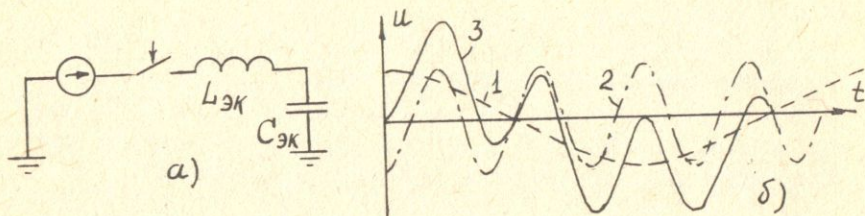


Рис. 2.2 Эквивалентная схема включения ненагруженной линии (а); временные диаграммы переходного процесса (б)

Это вызвано большим отношением частоты свободных колебаний к промышленной частоте. Так как включение происходит при угле  $\varphi = 90^\circ$ , амплитуда свободной составляющей равна амплитуде установившегося напряжения.

При АПВ линии переходный процесс сохраняет тот же колебательный характер, но наличие заряда на неповрежденных фазах может увеличить амплитуду свободной составляющей. Максимальные перенапряжения при АПВ возникают, когда мгновенное значение напряжения источника имеет противоположную полярность по отношению к полярности заряда, остающегося на неповрежденных фазах. Для расчета перенапряжений при АПВ можно использовать формулу (2.1) с добавлением члена  $\pm U_0 \cos \omega t e^{-\delta t}$ , в котором  $U_0$  определяется зарядом, оставшимся на линии. Знаки  $\pm$  учитывают полярность заряда, остающегося на неповрежденных фазах. Знак  $+$  соответствует совпадению полярности мгновенного значения напряжения источника с полярностью остающегося заряда, знак минус — несовпадению.

Перенапряжения при отключении больших токов. Существует три характерных случая возникновения перенапряжений при отключении больших токов: отключение симметричных коротких замыканий, отключение несимметричных коротких замыканий и отключение линии в режиме асинхронного хода. При отключении симметричных коротких замыканий переходный процесс

характеризуется несоответствием между начальным режимом (наличие короткого замыкания в конце линии) и конечным режимом (разомкнутая линия подключена к источнику). Переходный процесс при отключении рассчитывается методом наложения, т.е. между размыкающимися контактами выключателя вводится источник тока, равного по величине и обратного по направлению отключаемому току. Затем определяется напряжение, обусловленное включением источника тока, которое накладывается на начальное напряжение короткозамкнутой линии. В результате получаются формулы для определения напряжения в конце линии, аналогичные формулам при коммутации включения. Например, для схемы без продольной компенсации напряжение в конце линии

$$u(l) = A_{уст} \cos \omega t - \sum_{k=1}^{\infty} A_{k.кз} e^{-\delta t} \cos \omega_k t .$$

Как показывает анализ, все составляющие  $A_{k.кз}$  при отключении имеют одинаковый знак, в то время как при включении знаки  $A_k$  чередуются. При одностороннем отключении короткого замыкания амплитуда первой свободной составляющей в конце линии меньше, чем амплитуда вынужденной составляющей, в то время как при включении  $A_I > A_{уст}$ . Это означает, что при самых неблагоприятных условиях и без учета затухания ударный коэффициент при отключении короткого замыкания не может быть больше двух. Различие в переходных процессах при одностороннем включении линии и отключении короткого замыкания обусловлено тем, что в первом случае емкость линии не заряжена, т.е. вся линия имеет нулевые начальные условия, а во втором случае емкость линии заряжена до некоторого начального напряжения. Это обстоятельство уменьшает относительные амплитуды свободных колебаний при отключении по сравнению с режимом включения линии.

Перенапряжения при отключении несимметричных коротких замыканий возникают из-за неодновременной работы выключателей по концам линии. Амплитуда переходного процесса зависит от разности мгновенных значений напряжения на неповрежденных фазах до и после отключения. Ударный коэффициент обычно меньше, чем при коммутации включения в максимум э.д.с., как в силу специфических особенностей коммутации отключения, так и ввиду большого затухания свободных составляющих в схеме нулевой после-

довательности под влиянием сопротивления земли. Обычно ударный коэффициент  $K_{уд} = 1,4 \dots 1,6$ .

При нарушении устойчивости параллельной работы (режим асинхронного хода) электропередача может отключиться в момент, когда угол между э.д.с. по концам линии близок к  $180^\circ$ , а величина э.д.с. за счет действия регуляторов повысится на  $20 \dots 30\%$ . Такой режим близок к режиму короткого замыкания, так как по линии проходит большой индуктивный ток. При одновременном срабатывании выключателей по концам линии она на короткое время попадает в режим одностороннего питания, в котором напряжения существенно повышаются. Учитывая различные знаки установившегося и начального напряжений и повышенные значения э.д.с. источника, при отключении асинхронного хода можно ожидать  $K_{уд} > 2$  и максимальных перенапряжений около  $(3 \dots 3,5) U_\varphi$ . Однако перенапряжения такого рода возникает чрезвычайно редко.

Перенапряжения при отключении индуктивностей. При отключении индуктивности выключателем высокого напряжения при малых токах (ненагруженный трансформатор или реактор малой мощности) может происходить срез тока. В отключаемой цепи в момент обрыва тока накоплена энергия в магнитном поле индуктивности и емкости. Под действием этой энергии в цепи возникают колебания напряжения, которые без учета затухания

$$U_{\max} = \sqrt{U_0^2 + (I_0 \sqrt{L/C})^2}$$

В реальных условиях больших перенапряжений не наблюдается, так как если восстанавливающееся напряжение в момент отключения окажется выше электрической прочности межконтактного промежутка выключателя, то снова произойдет пробой промежутка, т.е. выключатель как бы ограничивает величину перенапряжений (рис. 2.3 б).

Первый срез тока происходит в момент времени  $t_0$ , после чего напряжение начинает возрастать по кривой  $U_{ож}$ , называемой ожидаемым напряжением. Повторный пробой между контактами произойдет в момент, когда кривая ожидаемого напряжения пересечется с кривой пробивного напряжения межконтактного промежутка

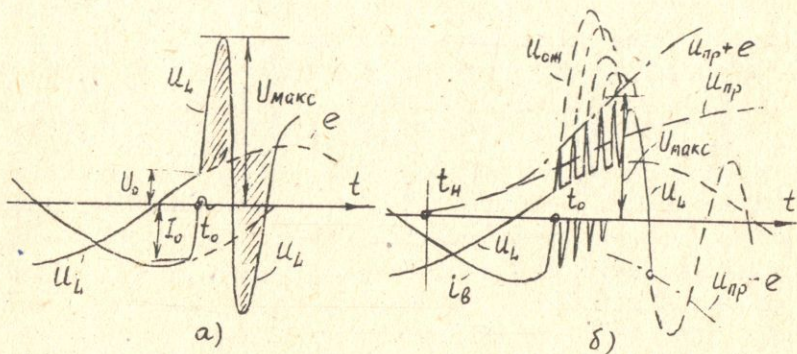


Рис. 2.3 Развитие перенапряжений при отключении индуктивностей без повторных зажигания дуги (а) и с вторными зажиганиями и дуги в выключателе (б)

$U_{пр}$ . После пробоя напряжение между контактами выключателя снизится практически до нуля, а напряжение  $U_{ож}$  — до величины напряжения источника. В выключателе снова появится ток, который быстро возрастает, после чего происходит новый срез тока, но уже при меньшем его мгновенном значении. Вследствие этого и амплитуда ожидаемого напряжения будет меньше. Процесс повторяется до тех пор, пока постепенно уменьшающийся максимум ожидаемого напряжения будет меньше восстанавливающейся прочности межконтактного промежутка выключателя.

Перенапряжения при отключении емкостей и ненагруженных линий. Процесс отключения сосредоточенной емкости показан на рис. 2.4. Допустим, что емкостной ток достаточно велик, поэтому среза тока в выключателе не происходит, и дуга гаснет в момент естественного перехода тока через нуль, а напряжение при этом проходит через свое максимальное значение. После обрыва тока напряжение на емкости сохраняет свою величину  $U_c = -U_\phi$ , а э.д.с. источника меняется по косинусоидальному закону. Разность  $e(t) - u_c = -U_\phi \cos \omega t - (-U_\phi) = U_\phi (1 - \cos \omega t)$



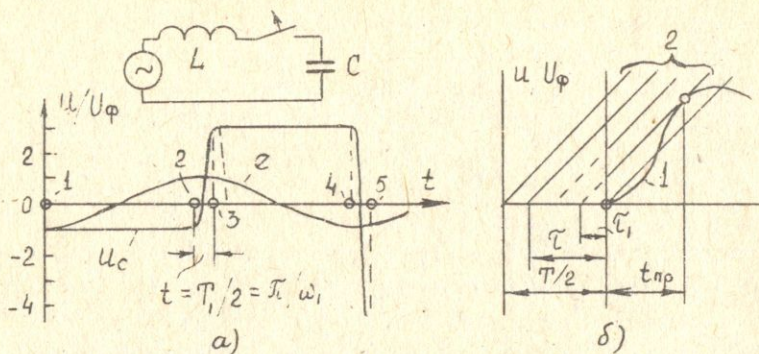


Рис. 2.4 Определение напряжения на емкости при отключении в идеализированном случае (а) и оценка вероятности повторных загораний с учетом характеристик выключателя (б)

представляет собой восстанавливающееся напряжение на выключателе, которое через полпериода достигает  $2U_\phi$ . Если это напряжение окажется гуще, чем электрическая прочность промежутка между контактами выключателя, то произойдет повторное загорание дуги в промежутке. Допустим, что повторное загорание дуги происходит при максимуме напряжения промышленной частоты. Колебательный контур  $L, C$ , емкость которого заряжена до  $(-U_\phi)$ , подключается к источнику э.д.с.  $e(t) = U_\phi \cos \omega t = U_\phi \sin(\omega t + \pi/2)$ . В схеме возникают высокочастотные колебания с частотой  $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$ , которые накладываются на напряжение промышленной частоты. Этот процесс аналогичен процессу при АПВ. Через полпериода собственных колебаний, т.е. при  $t = T_1/2 = \pi/\omega_1$ , напряжение достигнет максимума. Так как за это время напряжение промышленной частоты не успело существенно измениться, то без учета затухания напряжение

$$U_{\max} \approx U_\phi + 2U_\phi = 3U_\phi$$

Приблизительно в этот же момент суммарный ток, который в основном определяется свободной составляющей, проходит через нулевое значение, и дуга гаснет, а напряжение на емкости оста-

ется равным  $-3 U_{\phi}$ . Через полпериода напряжение источника станет равным  $-U_{\phi}$ , а напряжение между контактами выключателя возрастет до  $4 U_{\phi}$ , и может произойти еще одно повторное зажигание дуги, во время которого в контуре будут происходить колебания с амплитудой  $4 U_{\phi}$ . При этом максимальное напряжение на емкости достигнет  $-5 U_{\phi}$ . Если бы повторные зажигания дуги в выключателе продолжались неограниченно долго, перенапряжения на отключаемом конденсаторе непрерывно возрастали бы (рис. 2.4). Однако реальные характеристики выключателя вносят существенные изменения в количественную сторону процесса (рис. 2.4 б). Начала кривых восстанавливающегося напряжения 1 и пробивного напряжения 2 не совпадают, так как расхождение контактов может начаться в произвольный момент времени, а погасание дуги, после которого начинает восстанавливаться напряжение, происходит при переходе тока через нуль. Интервал между началом расхождения контактов и моментом обрыва тока  $\tau$  можно принять равным полупериоду промышленной частоты. Тогда при  $\tau > \tau_1$  повторного зажигания не произойдет, так как к моменту обрыва тока контакты расходятся настолько, что пробивное напряжение промежутка становится выше, чем восстанавливающееся напряжение. При  $\tau < \tau_1$  повторные зажигания возможны, но происходят не при максимальных, а при минимальных значениях напряжения.

Физический процесс при отключении ненагруженных линий имеет тот же характер, что и при отключении сосредоточенных емкостей. Однако при повторном зажигании, так же как при АПВ, возникает целый ряд свободных составляющих, которые наряду с увеличением свободной составляющей первой основной частоты увеличивает напряжение в конце линии. Напряжение в начале линии меньше, чем напряжение в конце линии. В предельном случае источника бесконечной мощности переходный процесс в начале линии вообще отсутствует, т.е. после повторного зажигания короткая линия мгновенно принимает потенциал  $U_0$ , равный э.д.с. источника. Поэтому восстанавливающееся напряжение не может в самом неблагоприятном случае превосходить значение  $U_0 + U_{\phi}$ , что для коротких линий составляет  $2 U_{\phi}$ . Таким образом, с увеличением мощности источника вероятность повторных зажиганий уменьшается. Применение современных воздушных выключателей обеспечивает снижение расчетного уровня перенапряжений до  $2,5 U_{\phi}$  и даже до  $2,0 U_{\phi}$ .

10 2.3. Дуговые перенапряжения при однофазных замыканиях на землю в системах с изолированной нейтралью

Электрические сети с изолированной нейтралью 6...35 кВ преобладают в системе электроснабжения промышленных предприятий и сельского хозяйства. Большинство замыканий на землю сопровождается возникновением дуги между токоведущим проводом и землей. При изолированной нейтрали через место замыкания на землю проходит емкостной ток, равный  $3\omega C_0 l U_{\phi}$ . В небольших сетях 6...35 кВ ток однофазного замыкания на землю составляет всего несколько ампер, поэтому замыкание на землю может практически не сказываться на условиях передачи энергии потребителям. Треугольник линейных напряжений остается неискаженным, а повышение напряжения на неповрежденных фазах относительно земли до линейного не представляет опасности для изоляции, так как ее уровень значительно выше. При малых токах наблюдается быстрое самопогасание дуги за счет ее удлинения под действием динамических сил и потоков воздуха. Гашение закрытых дуг обусловлено возникновением ударных явлений благодаря испарению и разложению пропиточной массы и выделению деионизированных газов. На основании опыта эксплуатации допускается работа сетей 3...35 кВ с изолированной нейтралью при емкостных токах замыкания на землю, не превышающих значений, приведенных в табл. 2.1. Увеличение протяженности электрических сетей приводит к увеличению емкостного тока до десятков и сотен ампер, что уже затрудняет условия деионизации дуги и увеличивает длительность ее горения. Этот процесс может быть неустойчивым, т.е. окончательному погасанию дуги предшествует несколько попыток гашения при переходе тока через нулевое значение с последующим повторным зажиганием дуги. Такая перемежающаяся дуга приводит к развитию колебаний при каждом обрыве и зажигании дуги, т.е. к появлению перенапряжений. Таблица 2.1

Номинальное напряжение, кВ	Допустимый емкостный ток, А	$I_{уд}$ , А/км·кВ линии		Длина линии, км	
		воздушной	кабельной	воздушной	кабельной
3-6	30	0,018	0,6	1700	50
10	20	0,03	1,0	700	20
15-20	15	0,06	2,0	250	7,5
35	10	0,105	3,5	100	3,0

Проведенные исследования в реальных сетях показывают, что кратность перенапряжений лишь в редких случаях превосходит уровень изоляции установок 6...35 кВ. Однако эти перенапряжения опасны не только своей амплитудой, но и длительностью, и высокочастотным характером процесса. Кроме того, они охватывают всю сеть в целом, что повышает вероятность перекрытия изоляции, которое может произойти не только у места замыкания, но и в удаленных точках. Устойчивая и перемежающаяся дуги могут гореть долго и переброситься на другие фазы, приводя к короткому замыканию.

З а з е м л е н и е   н е й т р а л и   ч е р е з   д у г о г а с я щ и й   р е а к т о р . Быстрая ликвидация дуги замыкания на землю может быть достигнута путем ограничения тока через дуговой промежуток и уменьшения скорости восстановления напряжения. Одним из наиболее распространенных способов уменьшения компенсации тока замыкания на землю является включение в нейтраль регулируемого реактора, который называют также дугогасящей катушкой (рис. 2.5а).

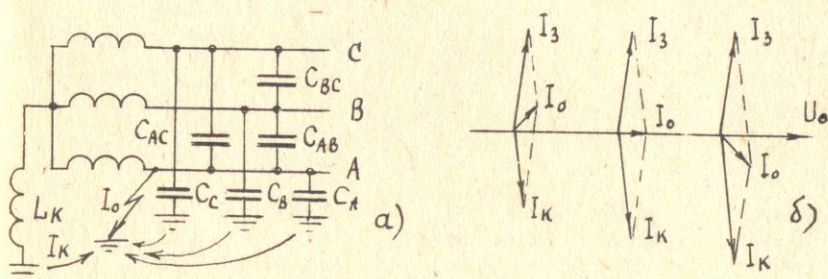


Рис. 2.5 Схема замещения сети с дугогасящей катушкой в нейтрали (а); векторные диаграммы для различной степени компенсации емкостного тока (б)

При равенстве частичных емкостей линии относительно земли для всех фаз потенциал нейтрали в нормальном режиме равен нулю и ток в катушке отсутствует. При однофазном замыкании на землю на нейтрали появляется напряжение нулевой последовательности, равное  $U_{\phi}$ , и в катушке возникает ток

$$I_k = \frac{U_{\phi}}{\chi_0 + j\omega L_0} \quad (2.5)$$

где  $L_0 = L_k + L/3$  — суммарная индуктивность;  $\chi_0$  — активное сопротивление нулевой последовательности. Через место замыкания на землю проходят ток катушки и ток замыкания на землю. Общий ток через место замыкания (остаточный ток  $I_0$ )

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + (I_c - I_{\nu})^2} \quad (2.6)$$

На рис. 2.5б приведена зависимость остаточного тока от индуктивного тока катушки для недокомпенсации, полной компенсации и перекомпенсации. Установлено, что с увеличением расстройки уменьшается время достижения максимума восстанавливающегося напряжения, т.е. увеличивается скорость восстановления напряжения на дуговом промежутке и его амплитуда; следовательно, повышается вероятность повторного зажигания дуги. Поэтому расстройка дугогасящей катушки не должна превышать 0,05...0,1. При этом условии дугогасящая катушка способствует гашению дуги как уменьшением тока через дуговой промежуток, так и снижением скорости восстановления напряжения.

Конструкция и включение дугогасящей катушки в сеть. Дугогасящие катушки выполняются со стальным сердечником, который имеет воздушные зазоры, для того чтобы обеспечить вольт-амперную характеристику, близкую к линейной. Благодаря этому уменьшается содержание высших гармоник в кривой тока через дуговой промежуток, присутствие которых может затруднить гашение дуги. Для регулировки настройки катушки выполняются с ответвлениями, позволяющими изменить ток компенсации в отношении 1 : 2 или 1 : 2,5. Катушка помещается в бак с маслом. Все реакторы снабжаются сигнальной обмоткой напряжением 100 В и током 10 А, а также встроенным трансформатором тока. Условное обозначение реактора ЗРОМ-175/6 — заземляющий реактор

однофазный масляный номинальной мощностью 175 кВ·А на номинальное напряжение 6 кВ. Существует также другое обозначение реактора согласно ГОСТ 19470-74 : РЗДСОМ-115/6 - реактор заземляющий со ступенчатым регулированием однофазный масляный мощностью при наибольшем рабочем напряжении 115 кВ·А на номинальное напряжение 6 кВ [10]. Для реакторов с плавным регулированием путем изменения зазора обозначение то же, но буква С заменяется на П (плавное регулирование). Максимальная длительность работы реактора при наибольшем токе и номинальном напряжении 6 ч.

Дугогасящие катушки желательно устанавливать на главных понижающих подстанциях (ГПП) или на узловых подстанциях. Суммарная мощность дугогасящих реакторов, установленных в сети, должна превосходить на 25% зарядную мощность линий, что учитывает возможное расширение сети, а также целесообразность работы с перекompенсацией. Для наилучшего использования мощности катушки трансформатор, в нейтраль которого она включена, должен иметь минимальное сопротивление нулевой последовательности, что обеспечивается наличием обмотки, соединенной в треугольник. Реактор может быть включен в нейтраль специального трансформатора, не несущего другой нагрузки, но может быть включен в нейтраль одного из работающих трансформаторов, который при этом получает дополнительную нагрузку. Допускается включение реактора мощностью, равной 50% мощности трансформатора, при условии, что она будет работать с наибольшим током компенсации не более 2 ч. При включении реактора в нейтраль трехобмоточного трансформатора мощность ее не должна превышать мощности обмотки, соединенной в треугольник.

#### 14. 2.4. Феррорезонансные перенапряжения

Феррорезонансные явления в электрических сетях возникает, когда наряду с линейной индуктивностью и емкостью имеются элементы, обладающие нелинейной характеристикой намагничивания. К таким элементам относятся, в первую очередь, ветви намагничивания (магнитные шунты) в схемах замещения трансформаторных обмоток. Если сопротивление схемы относительно магнитного шунта ненагруженного или малонагруженного трансформатора носит емкостный характер, то при этом могут возникнуть значительные пере-

напряжения. Эти перенапряжения являются типичным примером резонанса в нелинейных цепях (феррорезонанса) на промышленной частоте (гармонический резонанс) или на высших и низших гармониках (негармонический резонанс).

Определение тока и напряжения на отдельных частях схемы с нелинейной индуктивностью (рис. 2.6а) осуществляется графоаналитическим методом исходя из соотношения

$$E^2 = (U_L - U_C)^2 + (I\tau)^2 \quad (2.7)$$

Учитывая, что  $U_C = I/\omega C$  получим

$$U_L = (I/\omega C) \pm \sqrt{E^2 - (I\tau)^2} \quad (2.8)$$

Второй член в правой части уравнения (2.8) представляет собой эллипс (рис. 2.7 б) с центром в начале координат и полуосями, равными  $E$  (вертикальная ось) и  $E/\tau$  (горизонтальная ось). Сумма ординат эллипса и прямой  $I/\omega C$ , тангенс угла наклона которой пропорционален емкостному сопротивлению, дает правую часть уравнения. При  $\tau = 0$  эллипс превращается в две параллельные прямые с ординатами  $I/\omega C \pm E$ . Точки пересечения полученной кривой (в частном случае двух параллельных прямых) с вольт-амперной характеристикой нелинейной индуктивности дают возможные состояния равновесия схемы. В случае устойчивого состояния система при малых возмущениях стремится вернуться в исходное положение. Если в схеме существует емкостный режим, соответствующий точке  $\alpha$ , и происходит малое увеличение тока, то напряжение на емкости увеличивается в большей степени, чем напряжение на индуктивности, и возникает напряжение небаланса  $I/\omega C - U_L > E$ ; напряжения источника "не хватает" для того, чтобы поддержать приращение тока в схеме, и она возвращается в свое исходное состояние, т.е. режим, соответствующий точке  $\alpha$ , является устойчивым. Условие небаланса для точки б имеет такой вид:  $U_L - I/\omega C > E$ , т.е. также режим устойчив. Условие небаланса для точки в имеет иной вид:  $U_L - I/\omega C < E$ . В этом случае напряжение источника оказывается достаточным, и происходит дальнейшее приращение тока, т.е. режим неустойчив. С помощью такого графического построения можно найти зависимость напряжения на индуктивности, вольт-амперная характеристика которой остается неизменной, от величины емкости схемы. Для этого надо изменять наклон прямой  $I/\omega C$ .

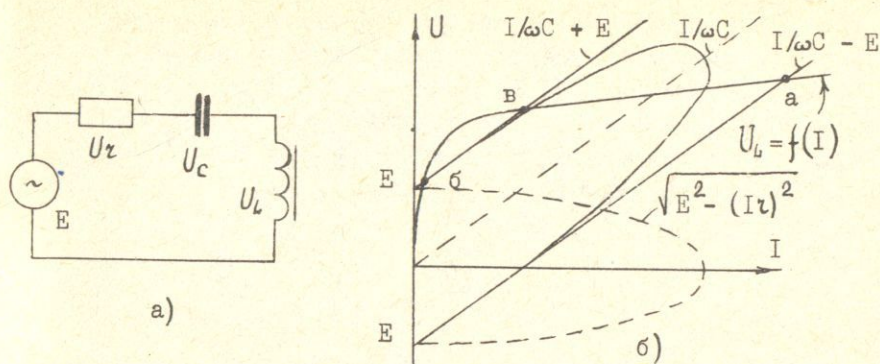


Рис. 2.6. Схема замещения колебательного контура с нелинейной индуктивностью (а); графическое определение напряжений при феррорезонансе для разных  $\gamma$  и  $C$  (б)

При исследовании реальных трехфазных схем при неполнофазных режимах они приводятся к эквивалентным однофазным схемам замещения и исследуются графоаналитическим методом. Максимальные перенапряжения при неполнофазных режимах в схемах с нелинейной индуктивностью могут достигать (3...4)  $U_{\phi}$ .

## 2.5. Резонансные перенапряжения

Резонанс является частным случаем проявления так называемого емкостного эффекта, обусловленного прохождением емкостного тока через сосредоточенную индуктивность источника и распределенную индуктивность линии. Отношение напряжений в конце и начале линии  $U_2/U_1$  называется коэффициентом передачи напряжения. Для холостой линии без потерь этот коэффициент

$$U_2/U_1 = 1/\cos \beta l \quad (2.9)$$

где  $\beta = \omega/c = 0,06^\circ/\text{км}$  — коэффициент изменения фазы;  $l$  — длина линии. На основании (2.9) построены зависимости отношения напряжения в конце разомкнутой линии от ее длины



(рис. 2.76). Эти зависимости имеют ярко выраженный резонансный характер. Для линии, присоединенной к источнику бесконечной мощности, резонанс наступает при  $\beta l = \pi/2$ , т.е. при  $l = 1500$  км.

На практике перенапряжения, обусловленные емкостным эффектом, ограничиваются вследствие возникновения короны, наличия компенсирующих устройств, насыщения трансформаторов.

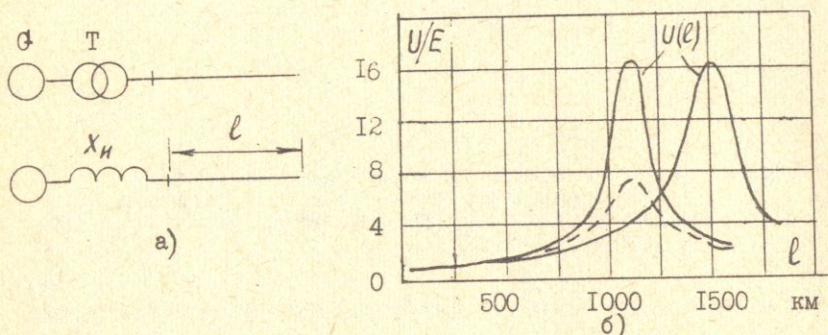


Рис. 2.7 Схема замещения для расчета перенапряжений в длинной линии, разомкнутой на конце (а), резонансные кривые (б)

Общая корона возникает на проводах линии сверхвысокого напряжения (СВН) уже при напряжении, на 15...20% превышающем рабочее напряжение линии, и является основным фактором, ограничивающим резонансные повышения напряжения промышленной частоты. Резонансный пик ограничивается короной до  $(2,5...3,0) U_{\phi}$ . Но перенапряжения даже таких значений опасны для линий СВН из-за их относительно большой длительности. Поэтому резонансные перенапряжения следует ограничивать до значений, близких к наибольшему рабочему напряжению линии.

Ограничение осуществляется с помощью реакторов поперечной компенсации. Реакторы компенсируют емкостной ток линии, протекающий через индуктивное сопротивление источника и, следовательно, уменьшают эквивалентную входную емкость линии. Существуют также другие мероприятия для ограничения перенапряжений на линиях СВН.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Инструкция по выбору, монтажу и эксплуатации средств защиты от перенапряжений. - М.: Энергия, 1969.
2. Инструкция по проектированию и устройству молниезащиты зданий и сооружений СН 305-77. - М.: Стройиздат, 1978.
3. Инструкция по устройству сетей заземления и зануления в электроустановках СН 102-76. - М.: Стройиздат, 1977.
4. Костенко М.В. и др. Физика грозового разряда и грозозащита линий электропередачи. Учебное пособие. - Л.: ЛПИ имени М.И. Калинина, 1982.
5. Костенко М.В. и др. Грозозащита подстанций и электрических машин высокого напряжения. Учебное пособие. - Л.: ЛПИ имени М.И.Калинина, 1982.
6. Ларионов В.П. и др. Техника высоких напряжений. - М.: Энергоиздат, 1982.
7. Нормы испытания электрооборудования. / Под общей редакцией С.Т.Королева. 5-е изд. - М.: Атомиздат, 1978
8. Нормы испытания электрооборудования и аппаратов электроустановок потребителей. - М.: Энергоиздат, 1982.
9. Правила устройства электроустановок ПУЭ-76. - М.: Атомиздат, 1976.
10. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения. / Под ред. И.А.Баумштейна и М.В.Хомякова. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981.
11. Техника высоких напряжений. / Под ред. Д.В.Разевига. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Энергия, 1976.
12. Криков П.А. Вентильные разрядники для электроустановок. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Энергия, 1975.
13. Криков П.А. Защита электростанций и подстанций 3...500 кВ от прямых ударов молнии. - М.: Энергоиздат, 1982.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

I.	Грозовые перенапряжения .....	3
I.1.	Физические процессы образования атмосферного электричества .....	3
48 I.2.	Краткие сведения о волновых процессах при воздействии молнии .....	7
44 I.3.	Защита от прямых ударов молнии .....	11
I.4.	Заземления в электрических установках высокого напряжения .....	20
I.5.	Конструкция аппаратов и устройств защиты от перенапряжений .....	25
I.6.	Грозозащита линий электропередачи .....	40
I.7.	Грозозащита подстанций объектов электроснабжения .....	48
I.8.	Грозозащита вращающихся электрических машин .....	57
2.	Внутренние перенапряжения .....	64
2.1.	Классификация внутренних перенапряжений .....	64
12 2.2.	Коммутационные перенапряжения .....	66
2.3.	Дуговые перенапряжения при однофазных замыканиях на землю в системах с изолированной нейтралью .....	75
2.4.	Феррорезонансные перенапряжения при неполнофазных режимах .....	78
2.5.	Резонансные перенапряжения .....	80

Св. план 1985г., поз. 997

Степан Петрович Косолапов

Защита от перенапряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий

Учебное пособие

Редактор Н.А.Фомичева

Корректор Е.С.Поздеева

Подписано в печать 11.04.85 Е001454

Формат 60 x 84/16 Бумага обертка белая

Печать оперативная. Усл. п.л. 5, Уч. изд. л.4.8

Тираж 300 экз. Заказ 2449 Цена 15 коп.

Политехнический институт, Тольятти, Белорусская, 14.

Областная типография им.Мяги, Куйбышев, Венцека, 60.

15 к.