

Перенапряжения в электрических сетях и их виды.

Перенапряжением называют всякое превышение напряжением амплитуды наибольшего рабочего напряжения. Длительность перенапряжения может составлять от единиц микросекунд до нескольких часов. Воздействие перенапряжения на изоляцию может привести к ее пробое. К основным характеристикам перенапряжения (которые, как правило, являются случайными величинами) относят следующие:

- максимальное значение;
- кратность перенапряжения, равная отношению максимального значения перенапряжения к амплитуде наибольшего допустимого рабочего напряжения;
- время нарастания перенапряжения;
- длительность перенапряжения;
- число импульсов в перенапряжении;
- широта охвата сети;
- повторяемость перенапряжения.

По месту приложения напряжения различают:

- фазные перенапряжения;
- междуфазные перенапряжения;
- внутрифазные перенапряжения например, между витками катушки трансформатора, между нейтралью и землей);
- между контактами коммутационных аппаратов.

По причинам возникновения перенапряжения подразделяются на следующие:

- внешние – от разрядов молнии (атмосферные перенапряжения) и от воздействия внешних источников;
- внутренние – возникающие при резонансных явлениях, при авариях и при коммутациях элементов электрической цепи.

В высоковольтных цепях главным источником внешних перенапряжений являются разряды молнии. Наиболее опасны прямые удары молнии в оборудование (ПУМ), при которых даже на заземленных сооружениях возникают большие потенциалы. Индуцированные перенапряжения возникают вследствие индуктивной и емкостной связи канала молнии с токоведущими и заземленными частями электрической сети. Величина индуцированных перенапряжений меньше, чем при прямых ударах молнии, и они опасны только для сетей до 35 кВ при ударе молнии вблизи линии.

Импульсы перенапряжений распространяются на значительные расстояния от места возникновения. Набегающие волны могут представлять опасность для электрооборудования подстанций, электрическая прочность которого ниже, чем у линейной изоляции.

Внутренние перенапряжения по длительности и по причине возникновения делятся на квазистационарные и коммутационные.

Квазистационарные перенапряжения продолжаются от единиц секунд до десятков минут и в свою очередь подразделяются на режимные, резонансные, феррорезонансные и параметрические. Режимные перенапряжения возникают при несимметричных коротких замыканиях на землю, а также при разгоне генератора в случае резкого сброса нагрузки. Резонансные перенапряжения имеют место при возникновении резонансных эффектов в линиях (при одностороннем питании линии), в электрических цепях при наличии реакторов. Феррорезонансные перенапряжения возникают в цепях с катушками с насыщенным магнитопроводом, что может быть как на частоте 50 Гц, так и на высших гармониках и на субгармониках. Особенностью феррорезонанса является скачкообразный вход в режим резонанса (триггерный эффект).

Коммутационные перенапряжения возникают при переходных процессах и быстрых изменениях режима работы сети (при работе коммутационных аппаратов, при коротких замыканиях и при прочих резких изменениях режима) за счет энергии, запасенной в емкостных и индуктивных элементах. Наиболее часто такие перенапряжения имеют место при коммутациях линий, индуктивных элементов, конденсаторных батарей.

Общая характеристика защитных мероприятий от перенапряжений

Все мероприятия по защите от перенапряжений делятся на две группы:

- превентивные меры снижения перенапряжений;
- защита оборудования с помощью коммутационных защитных средств.

Превентивные меры – это предотвращение возникновения перенапряжений или ограничение их величины в месте их возникновения. К таким мерам относятся следующие меры:

- применение выключателей с шунтирующими резисторами;
- применение выключателей без повторных зажигания дуги между контактами при их разведении;
- применение грозозащитных тросов и молниеотводов;
- заземление опор линий электропередачи;
- емкостная защита изоляции обмоток трансформаторов и реакторов;
- применение емкостных элементов для снижения перенапряжений.

Коммутационные средства защиты от перенапряжений срабатывают и соединяют защищаемую цепь с заземлением в случае, когда перенапряжение в точке их установки превышает некоторую критическую величину. К этим средствам относят разрядники, шунтирующие реакторы с искровым соединением и нелинейные ограничители перенапряжений.

Характеристики грозовой деятельности и параметры молний

Для прогноза атмосферных перенапряжений и обоснованного выбора средств защиты необходимо иметь информацию:

- о возможном количестве разрядов молнии в защищаемое оборудование или вблизи него;
- о токах в разряде молнии.

Первый вопрос решается путем анализа многолетних метеорологических наблюдений и использованием средних характеристик грозовой деятельности. Второй вопрос более сложен из-за сложности прямых измерений токов в разряде молнии, однако многочисленные исследования в этом направлении позволили получить приемлемые статистические данные по параметрам разрядов молнии.

Степень опасности удара молнии определяется прежде всего максимальным значением тока I_m в канале.

Величина падения напряжения на индуктивных элементах и величины индуктированных

перенапряжений зависят от скорости нарастания тока молнии $a = \frac{di_m}{dt}$ на фронте волны. Это

наиболее важные параметры тока; кроме того, интеграл $\int i_m^2 dt$ определяет нагрев металлических частей, а оплавление металлических частей дугой зависит от величины перенесенного заряда. Обнаружено, что амплитуда тока главного разряда практически не зависит от сопротивления заземления в месте удара, так что молнию можно считать источником тока.

В приближенных расчетах используют усредненные распределения I_m и a без учета их различия в первом и последующем импульсах:

- $P(I_m) = e^{-0.04 I_m}$ - вероятность того, что амплитуда тока в ударе молнии превысит заданное значение I_m в кА (этот подход практически удобнее, чем обычное определение вероятности как доли всех реализаций при значениях случайной величины, меньших заданной);
- $P(a) = e^{-0.08 a}$ - вероятность превышения крутизной тока заданного значения a , кА/мкс.

Между амплитудой и крутизной тока существует слабая положительная связь, однако при расчетах их обычно полагают статистически независимыми случайными величинами. В горных районах при тех же вероятностях величины I_m и a примерно вдвое меньше.

Для прогноза количества ударов молнии в защищаемый объект используют метеорологическую характеристику интенсивности грозовой деятельности – число часов с грозой в год в данной

местности T_r – и среднее число ударов молнии в 1 км^2 поверхности земли за 100 грозочасов,

$$N_1 = 6.7 \frac{1}{100 \text{ ч} * \text{км}^2}.$$

Возвышенные объекты стягивают на себя удары молний с площади большей, чем их собственная площадь. Число прямых ударов в здания высотой H или в открытые распределительные устройства с молниеотводами высотой H в течение года вычисляется с увеличением горизонтальных размеров объекта A и B (в метрах) на $3.5H$ во все стороны:

$$N_{\text{пум}} = N_1 \frac{T_r}{100} (A + 7H)(B + 7H) \cdot 10^{-6},$$

сомножитель 10^{-6} производит перевод квадратных метров в квадратные километры для согласования с размерностью N_1 .

Для линий электропередачи используют удельный показатель $N^*_{\text{пум}}$, равный числу прямых ударов молнии на 100 км длины за 100 грозочасов. Считается, что линия собирает разряды с расстояния $3h_{\text{cp}}$ в обе стороны:

$$N^*_{\text{пум}} = 6.7 \frac{1}{\text{км}^2} * 100 \text{ км} * 6h_{\text{cp}} * 10^{-3} \approx 4h_{\text{cp}}.$$

Средняя высота подвеса провода h_{cp} , м, определяется через высоту подвеса троса или верхнего провода на опоре $h_{\text{оп}}$, м, и стрелу провеса провода f , м, следующим образом:

$$h_{\text{cp}} = h_{\text{оп}} - \frac{2}{3}f.$$

Если линия имеет длину l , км, и расположена в местности с числом грозочасов в год T_r , то

ожидаемое число прямых ударов молнии в линию за год $N_{\text{пум}}$ можно оценить по следующей формуле:

$$N_{\text{пум}} = N^*_{\text{пум}} \frac{l}{100} \frac{T_r}{100}.$$

Устройство и принцип действия трубчатого разрядника.

Защитные аппараты, обеспечивающие не только защиту изоляции от перенапряжений, но и гашение дуги сопровождающего тока в течение времени меньшего, чем время действия релейной защиты, получили название защитных разрядников.

В трубчатых разрядниках гашение дуги сопровождающего тока происходит в результате интенсивного продольного дутья.

Принципиальная схема устройства и включения трубчатого разрядника (РТ) показана на рис. 5.

Основу разрядника составляет трубка из газогенерирующего материала 1. Один конец трубки заглушён металлической крышкой, на которой укреплен внутренний стержневой электрод 2. На открытом конце трубки расположен другой электрод в виде кольца 3. Промежуток l_1 между стержневым и кольцевым электродами называется внутренним, или дугогасящим, промежутком. Трубка отделяется от провода фазы внешним искровым промежутком l_2 , иначе газогенерирующий материал трубки постоянно разлагался бы под действием токов утечки.

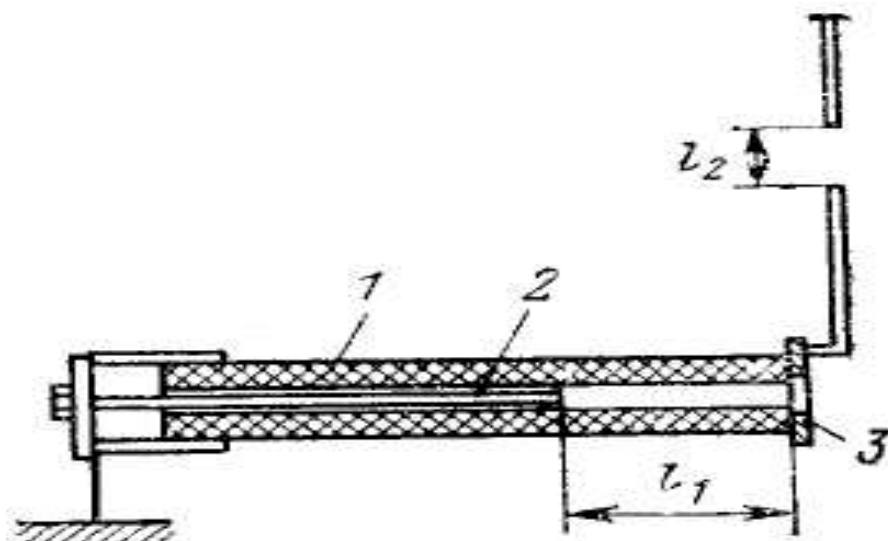


Рис. 5. Принципиальная схема устройства и включения трубчатого разрядника

Защитное действие трубчатого разрядника характеризуется его вольт-секундной характеристикой и сопротивлением заземления. Вольт-секундная характеристика определяет напряжение срабатывания; разрядника, а сопротивление заземления - остающееся на разряднике после его срабатывания импульсное напряжение. Вольт-секундная характеристика зависит от длины внешнего и внутреннего промежутков разрядника. Длина внешнего искрового промежутка выбирается по условиям защиты изоляции и может регулироваться в определенных пределах. Длина внутреннего искрового промежутка устанавливается в соответствии с дугогасящими свойствами разрядника и регулированию не подлежит.

При воздействии на РТ импульса грозового перенапряжения оба промежутка пробиваются (перекрытие по внешней поверхности не может произойти, поскольку разрядное расстояние по этой поверхности много больше длины внутреннего промежутка) и происходит ограничение импульса напряжения. По каналам разряда пробитых промежутков проходит сопровождающий ток рабочей частоты. Под действием высокой температуры канала дуги переменного тока в трубке происходит интенсивное выделение газа. Давление в трубке увеличивается. Газы, устремляясь к открытому концу трубки, создают продольное дутье, в результате чего дуга гасится при первом же прохождении тока через нулевое значение. Срабатывание разрядника сопровождается выхлопом раскаленных газов и звуком, напоминающим выстрел.

Для успешного гашения дуги сопровождающего тока необходимо достаточно интенсивное генерирование газа в трубке, которое зависит от проходящего тока. Поэтому имеется нижний предел токов, которые надежно отключаются трубчатым разрядником. При больших токах слишком интенсивное газообразование может привести к чрезмерному повышению давления и разрыву трубки или срыву наконечников. Поэтому для трубчатых разрядников устанавливается также верхний предел отключаемых токов, при котором гашение дуги еще не может сопровождаться механическим повреждением разрядника.

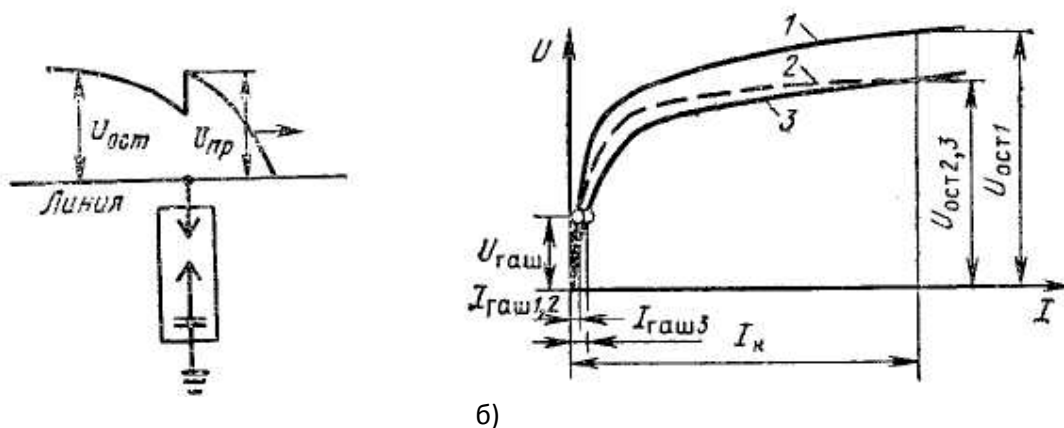
Крутая ВСХ и наличие выхлопа не позволяют использовать ТР для защиты подстанционного оборудования. Основное назначение ТР – защита линейных подходов к ПС. Электрооборудования маломощных ПС 3-10 кВ и участков пересечения линий различного $U_{ном}$.

Устройство и принцип действия вентильного разрядника.

Для защиты изоляции электрооборудования подстанций применяются вентильные разрядники (РВ) и нелинейные ограничители напряжения (ОПН). В соответствии с защитными характеристиками этих аппаратов устанавливаются уровни изоляции трансформаторов и аппаратов подстанций.

Основными элементами вентильного разрядника являются многократный искровой промежуток и соединенный последовательно с ним резистор с нелинейной вольт-амперной характеристикой (рис. 6а). При воздействии на РВ импульса грозового перенапряжения пробивается искровой промежуток (ИП) и через разрядник проходит импульсный ток, создающий падение напряжения

на сопротивлении резистора. Благодаря нелинейной вольт-амперной характеристике это падение напряжения мало меняется при существенном изменении импульсного тока (рис. 6б).



а) б)
Рис.6. Схема включения (а) и вольт-амперные характеристики вентильного разрядника (б): 1 и 2 разные нелинейности резистора, 1и 3 разные токи гашения.

Одной из основных характеристик РВ является остающееся напряжение $U_{ост}$, представляющее собой падение напряжения на сопротивлении резистора при определенном импульсном токе (5—14 кА в зависимости от типа РВ), который называется током координации.

Остающееся напряжение и близкое к нему по значению импульсное пробивное напряжение искрового промежутка РВ $U_{ост}$ должны быть на 20—25 % ниже разрядного или пробивного напряжения защищаемой изоляции (координационный интервал).

Вслед за импульсным током через РВ проходит сопровождающий ток промышленной частоты. Сопротивление нелинейного резистора при рабочем напряжении резко возрастает, сопровождающий ток существенно ограничивается, и при переходе его через нулевое значение дуга в искровом промежутке гаснет.

Наибольшее напряжение промышленной частоты на РВ, при котором надежно обрывается сопровождающий ток, называется напряжением гашения $U_{гаш}$, а соответствующий сопровождающий ток — током гашения $I_{гаш}$.

Основу нелинейного резистора составляет порошок электротехнического карборунда **SiC**. На поверхности карборунда имеется запорный слой толщиной порядка 100 мкм из окиси кремния SiO_2 , сопротивление которого нелинейно зависит от напряженности электрического поля. При малых напряженностях поля (при небольших напряжениях на резисторе) удельное сопротивление слоя составляет $10^4—10^6$ Ом*м, и практически все напряжение ложится на него, так как удельное сопротивление самого карборунда значительно меньше — около 10^{-2} Ом*м. 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 напряжения, обеспечивая пропускание очень больших токов при высоких напряжениях и весьма малых при пониженных, называют «вентильным».

Ограничители перенапряжений.

Основной недостаток вентильных разрядников связан с тем, что резисторы на основе карборунда обладают сравнительно невысокой нелинейностью. Снижение защитного отношения РВ ($U_{ост}/\sqrt{2} U_{гаш}$) достигается ценой значительного усложнения искровых промежутков

Разработанные в последнее время в СССР и за рубежом резисторы на основе окиси цинка обладают значительно большей нелинейностью, чем резисторы на основе карборунда. Это позволило создать новый тип защитного аппарата - нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН). В ограничителях перенапряжений в силу очень большой нелинейности характеристики резистора сопровождающий ток при рабочем напряжении имеет значение долей миллиампера, что безопасно для защитного аппарата и не создает заметных потерь энергии. Поэтому ОПН выполняются без искровых промежутков.

По сравнению с вентильными разрядниками ограничители перенапряжений обладают следующими преимуществами:

- глубоким уровнем ограничения всех видов перенапряжений;
- отсутствием сопровождающего тока после затухания волны перенапряжения;
- простотой конструкции и высокой надежностью в эксплуатации;
- стабильностью характеристик и устойчивостью к старению;
- способностью к рассеиванию больших энергий;
- стойкостью к атмосферным загрязнениям;
- малыми габаритами, весом и стоимостью.

33. Защита вращающихся машин от перенапряжений

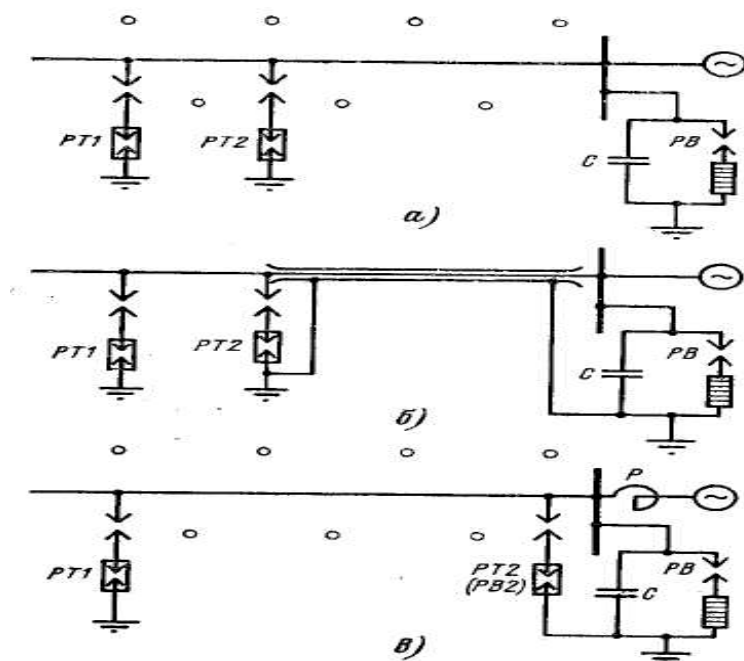


Рис. 7. Схемы защиты вращающихся машин, работающих на воздушную сеть.

а — схема защиты с воздушным подходом; б — схема с использованием защитных свойств кабельной вставки; в — схема с воздушным подходом и реактором.

Для ограничения крутизны, обуславливающей напряжения на междувитковой изоляции, параллельно разряднику включается конденсатор емкостью 0,25—0,5 мкФ.

Принципиальная схема защиты генератора, присоединенного непосредственно к воздушной линии, представлена на рис. 7, а. Так как линии 3—10 кВ имеют одностоечные опоры и подвеска тросов удорожает стоимость линии, то подход на участке длиной 300-500 м защищается отдельно стоящими стержневыми молниеотводами, что исключает также возможность обратного перекрытия, и ТР. Если линия проходит по застроенной местности или рядом с другими линиями передачи, то установки молниеотводов не требуется, так как в этих случаях вероятность поражения линии мала. При длине подхода 500—600 м сопротивления заземления трубчатых разрядников должны быть порядка 5 Ом; если выполнить это требование невозможно, нужно установить еще один комплект трубчатых разрядников (на другой опоре). При меньших сопротивлениях заземления подход может быть короче.

Очень часто между линией и шинами генераторного напряжения имеется кабельная вставка длиной около 100 м, которая может быть использована для улучшения грозозащиты машин. Для этой цели используется схема на рис. 7, б. При срабатывании разрядника, установленного в месте перехода воздушной линии в кабель, жила кабеля соединяется с оболочкой и они приобретают одинаковое напряжение относительно земли. Вследствие поверхностного эффекта ток вытесняется с жилы на оболочку кабеля. Если кабель проложен непосредственно в земле, часть,

тока стекает с оболочки в землю. В результате снижается амплитуду импульса, проходящего к машине. Схема с кабельной вставкой обладает большим уровнем грозоупорности при условии надежного срабатывания трубчатого разрядника *PT2*. Это условие не всегда выполняется, так как коэффициент преломления при переходе воздушной линии в кабель примерно равен 0,1. Поэтому пробой разрядника возможен при непосредственном поражении молнией или при набегании с линии волн с максимальными значениями 400—500 кВ. Для обеспечения пробоя трубчатого разрядника его целесообразно удалить от места перехода воздушной линии в кабель на один-два пролета (разрядник *PT1* на рис. 7, б). Применение двух разрядников *PT1* и *PT2* повышает надежность схемы.

Улучшению грозозащиты способствует также реактор, включенный для ограничения токов к. з. (рис. 7, б). Индуктивность реактора снижает крутизну напряжения на обмотке машины и повышает напряжение со стороны линии, способствуя ускоренному срабатыванию разрядника *PT2* или *PB2* и ограничению максимального значения волны, приходящей с линии (*PB2* устанавливается в тех случаях, когда нельзя подобрать трубчатый разрядник, способный отключать большие токи к.з. у шин станции).

При одновременном использовании кабельной вставки и реактора получаются наиболее надежные схемы грозозащиты.

. Перенапряжения при отключении ненагруженных трансформаторов

Значительные коммутационные перенапряжения могут возникнуть и при отключениях ненагруженных или слабонагруженных трансформаторов. После начала расхождения контактов выключателя при отключении между ними некоторое время продолжает гореть электрическая дуга. Момент обрыва тока зависит от скорости деионизации дуги, которая в свою очередь определяется характеристиками выключателя и обрываемым током. При больших токах сопротивление растягивающейся дуги невелико и не оказывает влияния на форму тока; окончательный разрыв цепи практически происходит в момент прохождения тока через нулевое значение. При малых токах (например, при отключении ненагруженных трансформаторов) степень ионизации дуги оказывается незначительной, и под действием рабочего дутья выключателя может произойти очень быстрый распад дугового канала еще до того, как ток проходит через свое нормальное нулевое значение, сопротивление дуги скачкообразно возрастает, а ток в дуге резко падает до нуля - происходит «срез» тока, который характеризуется значением $I_0 \neq 0$. При этом выделяется большая энергия, запасенная в индуктивности схемы L , например в индуктивности намагничивания трансформаторов, что может привести к значительным перенапряжениям

Уменьшение величины перенапряжений достигается при установке в каждой дугогасительной камере МВ помимо главных, вспомогательных контактов, которые шунтируются резисторами и размыкаются первыми.

Перенапряжения при отключении ненагруженных линий.

Физический процесс при отключении ненагруженных линий имеет тот же характер, что и при отключении сосредоточенных емкостей.

Схема, содержащая ненагруженную линию, представляет собой многочастотный колебательный контур, содержащий индуктивность и емкость. Так же, как при включении и АПВ, при повторном зажигании дуги в выключателе возникает целый ряд свободных составляющих, которые наряду с увеличением свободной составляющей первой основной частоты увеличивают напряжение в конце линии. Максимальная кратность перенапряжений при этом может достигать 3,5.

Напряжение в начале линии при этом меньше, чем напряжение в конце линии.

Если на линии имеются реакторы, то после обрыва дуги емкость линии начинает разряжаться на реактор и возникают затухающие колебания с частотой, которая обычно меньше частоты источника. Наличие реакторов является благоприятным фактором, так как уменьшает восстанавливающееся напряжение и скорость его нарастания.

Отключение ненагруженных линий 500 кВ обычно не сопровождается повторными пробоями при использовании воздушных выключателей даже при отсутствии реакторов или масляных выключателей, но при включенных шунтирующих реакторах. Вследствие указанных причин (применение реакторов, быстродействующих воздушных выключателей) отключение

ненагруженной линии СВН (500 кВ и выше) не является расчетной операцией, т. е. обычно не учитывается при проектировании защиты от внутренних перенапряжений.

.Основные принципы защиты подстанций от перенапряжений.

Надежность защиты подстанций от перенапряжений должна быть значительно выше надежности защиты линий, поскольку ущерб от повреждения здесь значительно больше, а уровень изоляции ниже.

Основные принципы защиты оборудования подстанций сводятся к следующему:

- защита от прямых ударов молнии стержневыми молниеотводами;
- защита оборудования от волн, приходящих с линии, с помощью разрядников или ОПН;
- защита подходов линий от прямых ударов молнии.

Зоны защиты молниеотводов определяют исходя из того, чтобы вероятность прорыва молнии в защищаемый объект не превосходила 0.05 (одно попадание прямого удара из двадцати ударов), иногда – 0.005.

Для успешной **защиты оборудования от волн**, набегающих с линии, разрядник должен иметь пробивное и остающееся напряжение ниже допустимого на защищаемом объекте на некоторую величину, называемую интервалом координации, который должен составлять не менее 15% уровня допустимого напряжения. Особенностью перенапряжений на подстанции является их существенная зависимость от крутизны фронта набегающей волны и слабая зависимость от амплитуды набегающей волны. Амплитуда влияет лишь на величину остающегося напряжения, слабо меняющегося благодаря пологой вольтамперной характеристике нелинейного резистора разрядника или ОПН. Величина перенапряжения зависит от крутизны набегающей волны потому, что при прохождении волны от объекта до разрядника (если объект оказался первым по ходу волны) и обратной волны от сработавшего разрядника до объекта подъем напряжения на объекте за время двойного пробега прямо определяется скоростью нарастания напряжения падающей волны.

При продвижении волны вдоль линии фронт волны сглаживается (удлиняется) за счет импульсной короны, потерь в земле и в проводах, поэтому выполняют **защиту подходов линий от прямых ударов молнии** на определенной длине (рис. 8), что к тому же снижает величину тока в разрядниках подстанции. Количество и места установки ОПН и разрядников выбирают так, чтобы расстояние между разрядниками и защищаемыми объектами не превышали безопасной величины (от 30 м до 150 м для разных случаев).

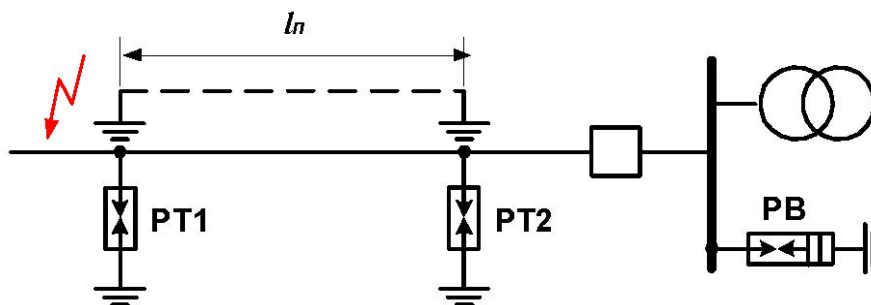


Рис. 8. Схема защищенного подхода линии электропередачи

При защите подхода линии грозозащитные тросы подвешивают даже в случае их отсутствия на других участках линии, трос заземляют на каждой опоре, а сопротивление заземления опоры выдерживают на уровне не более 10-20 Ом. В начале подхода устанавливают трубчатый разрядник, способствующий ограничению амплитуды тока в разряднике подстанции. Второй трубчатый разрядник РТ2 предназначен для защиты выключателя. На подстанциях напряжений 110-220 кВ обычно устанавливают один комплект разрядников на каждую систему шин. Длина защищаемого подхода составляет обычно 1-2 км.

Подстанции напряжением 3..20 кВ имеют обычно кабельные вводы. Обобщенная схема защиты от перенапряжений такой подстанции показана на рис. 9.

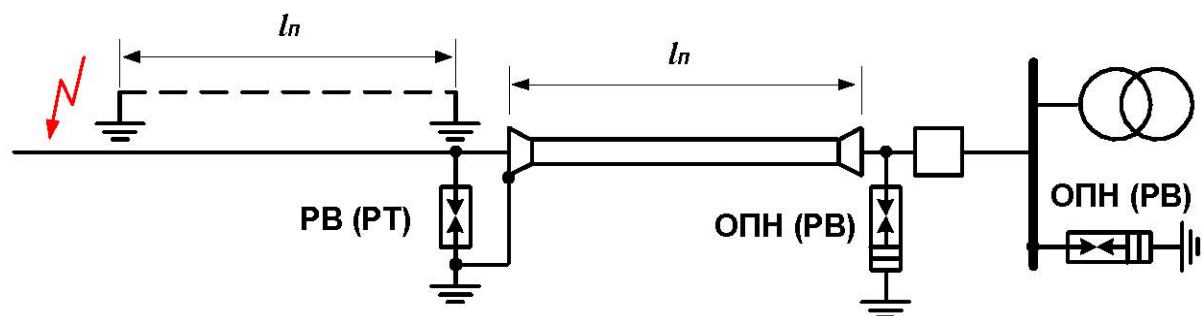


Рис. 9. Обобщенная схема защиты подстанции 3-20 кВ

Наличие кабельной вставки на входе такой подстанции обычно не обеспечивает достаточной грозоупорности подстанции из-за неизбежных многократных отражений волн в кабельной линии. Поэтому в месте соединения воздушной линии с кабельной устанавливают вентильный или трубчатый разрядник для ограничения приходящей волны. Вентильный разрядник в конце кабеля устанавливается из-за возможности повреждения кабельной муфты из-за удвоения волны при отключенном выключателе.