

Д.т.н., профессор
Ф.Х.Халилов

**Средства защиты от перенапряжений. Молниезащита и
электромагнитная совместимость в электроэнергетике.**

Санкт-Петербург
2012

Халилов Ф.Х. Средства защиты от перенапряжений. Молниезащита и электромагнитная совместимость в электроэнергетике. Учебное пособие. Издание НОУ “Центр подготовки кадров энергетики”, Санкт-Петербург, 2012.

В настоящем учебном пособии рассмотрены средства защиты от перенапряжений, молниезащита линий, подстанций и высоковольтных электрических машин, электромагнитная совместимость в электроэнергетике.

Учебное пособие предназначено для слушателей групп повышения квалификации по курсу “Перенапряжения в электроэнергетике и координация изоляции”, а также для студентов электроэнергетических специальностей ВУЗов.

Учебное пособие рассмотрено и одобрено на заседании кафедры “Оперативно-диспетчерское управление энергосистемами”.

Научный редактор д.т.н., профессор Меркурьев Г.В.

Оглавление

	стр
Введение	4
1. Характеристика средств защиты от перенапряжений	5
1.1. Общая характеристика средств защиты от перенапряжений. .	5
1.2. Средства защиты от перенапряжений.	5
2. Молниезащита линий	17
2.1. Задачи и критерии молниезащиты линий.	17
2.2. Молниезащита воздушных линий различных классов напряжения.	19
3. Молниезащита подстанций и электрических машин высокого напряжения	31
3.1. Задачи и критерии грозозащиты подстанций.	31
3.2. Молниезащита подстанций различных классов напряжения. .	32
3.3. Молниезащита электрических машин.	37
4. Воздействия перенапряжений на изоляцию электроуста- новок	40
4.1. Воздействие импульсных перенапряжений на газовую изо- ляцию электрических аппаратов.	40
4.2. Воздействие перенапряжений на комбинированную изоля- цию.	48
4.3. Воздействие электрического поля на полимерную изоляцию.	51
5. Проблемы электромагнитной совместимости в электро- энергетике	54
5.1. Электромагнитная совместимость электроэнергетики с окружающей средой (ЭКО-ЭМС).	54
5.2. Электромагнитная совместимость электроэнергетики с биосферой (БИО-ЭМС).	58
5.3. Электромагнитная совместимость электроэнергетики с протяженными металлическими сооружениями техносферы (ТЕХНО-ЭМС)	63
5.4. Электромагнитная совместимость электроэнергетики с электроносферой (ЭЛЕКТРОНО-ЭМС).	68
5.5. Внутренняя электромагнитная совместимость между подсистемами электроэнергетики (ИНТЕР-ЭМС).	70

Введение

Молниезащита элементов энергосистем (линий, подстанций и высоковольтных электрических машин) имеет важное значение для устойчивой работы изоляции. Поэтому меры и мероприятия по обеспечению приемлемой молниезащиты должны отвечать требованиям ПУЭ и Руководства по защите электрических сетей 6-1150 кВ от перенапряжений.

Надежная молниезащита обеспечивается комплексом средств защиты, характеристики которых должны быть скоординированы с характеристиками импульсных перенапряжений и электрической прочности изоляции при грозовых воздействиях.

Брошюра посвящена средствам защиты от перенапряжений, молниезащите линий, подстанций и высоковольтных машин, а также координации изоляции.

1. Характеристика защиты от перенапряжений

1.1. Общая характеристика средств защиты от перенапряжений

Общее назначение мер защиты от перенапряжений состоит в том, чтобы при минимальных дополнительных затратах получить максимальный экономический эффект от снижения ущерба, вызванного перенапряжениями, и от повышения надежности работы энергосистем.

Превентивные меры защиты оказывают постоянное влияние на сеть. Их назначение - предотвратить возникновение перенапряжений или способствовать ограничению их величины. Благоприятное действие превентивных мер защиты проявляется на протяжении всего переходного процесса. К таким мерам можно отнести, в частности, применение выключателей, работа которых не вызывает появления больших перенапряжений (например, выключателей без опасных повторных зажиганий дуги между контактами и с шунтирующими сопротивлениями), грозозащитных тросов, заземление опор на линии электропередачи, емкостную защиту изоляции обмоток трансформаторов и реакторов, заземление нейтрали трансформаторов через дугогасящие катушки.

Коммутационные средства защиты от перенапряжений, как правило, содержат в себе коммутирующие элементы, например, искровые промежутки. Они срабатывают, когда перенапряжение в точке их установки превысит некоторую критическую величину. К коммутационным средствам защиты относятся вентильные разрядники и ОПН (а в старых сетях - трубчатые разрядники и защитные искровые промежутки), а также шунтирующие реакторы с искровым присоединением. К коммутационным средствам защиты можно отнести также и нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН). В ОПН отсутствуют искровые промежутки, и высоколинейные резисторы подключены к сети постоянно. Однако при повышении напряжения на ОПН сверх наибольшего рабочего резко уменьшается их сопротивление, что эффективно снижает воздействующие перенапряжения.

Для защиты оборудования от прямых ударов молнии применяют стержневые молниеотводы на подстанциях и грозозащитные тросы на линиях. Уменьшение вероятности опасных грозовых перенапряжений при ударах молнии в молниеотводы и другие заземляющие элементы линий и подстанций достигается соединением их с землей при обеспечении достаточно малого импульсного сопротивления заземления. Защита изоляции от волн, набегающих по линиям электропередачи, осуществляется с помощью вентильных и трубчатых разрядников или нелинейных ограничителей перенапряжений.

1.2. Средства защиты от перенапряжений

В сетях 6...35 кВ уровни изоляции обеспечивают, как правило,

достаточно высокую надежность работы сети при воздействии подавляющего большинства внутренних перенапряжений. Главное внимание уделяют мерам грозозащиты. Основным мероприятием, направленным на повышение грозоупорности этих сетей, является режим изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтрали. Резервной мерой, направленной на устранение последствий междуфазных перекрытий и перекрытий нескольких фаз на землю, является АПВ.

Сети 110...220 кВ, согласно ПУЭ, также не требуют установки специальных устройств для защиты от внутренних перенапряжений, за исключением особо неблагоприятных схем. Для грозозащиты применяют: тросы и заземления опор на линиях, молниеотводы, разрядники и нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) на подстанциях и усиленную защиту подходов ВЛ к подстанциям. Отдельные точки линии (пересечения, опоры с ослабленной изоляцией и т. п.) защищают разрядниками или ОПН.

Сети 330 кВ и выше имеют меньшие коэффициенты запаса электрической прочности изоляции. В них необходимо применять комплекс мер для защиты, как от грозовых, так и от внутренних перенапряжений. В отечественных сетях применяется глухое заземление нейтрали, шунтирующие реакторы на линиях для снижения вынужденной составляющей перенапряжений, электромагнитные трансформаторы напряжения на линии для снятия остаточного заряда во время бестоковой паузы АПВ, вентильные разрядники или ОПН с характеристиками, позволяющими эффективно ограничивать как коммутационные, так и грозовые перенапряжения, молниеотводы и грозозащитное заземление.

Помимо перечисленных мероприятий, в ряде случаев применяют выключатели с шунтирующими сопротивлениями (в том числе многоступенчатого действия) и автоматический выбор фазы замыкания контактов выключателя (т. н. "синхронное включение"). Для повышения надежности грозозащиты линий ультравысокого напряжения используются тросы с отрицательными углами защиты.

Наиболее старым, простым и дешевым устройством защиты от перенапряжений первоначально являлись искровые промежутки. В сетях 3...35 кВ искровой промежуток обычно выполнялся в виде "рогов". При такой форме электродов электродинамические силы и тепловые потоки воздуха перемещают возникшую после перекрытия дугу вверх по "рогам". Это приводит к ее растягиванию и успешному гашению.

В сетях до 35 кВ защитные промежутки имеют небольшую длину и могут закорачиваться птицами, садящимися на электроды. С целью предотвращения замыканий, в заземляющих спусках защитных промежутков создаются дополнительные искровые промежутки.

Искровые промежутки обладают рядом недостатков, которые ограничивают их применение. Пробивное напряжение искровых промежутков имеет большой статистический разброс, что сильно затрудняет координацию пробивных напряжений ИП с характеристиками защищаемой

изоляции. Вследствие резкой неоднородности электрического поля между контактами имеет место существенное повышение разрядного напряжения ИП при крутых фронтах волн воздействующих перенапряжений. В области малых предразрядных времен ($t_{кр} \leq 2$ мкс) вольт-секундная характеристика изоляции (с учетом статистического разброса) может проходить ниже вольт-секундной характеристики ИП (рис. 1.1), то есть при временах $t \leq t_{кр}$ изоляция остается незащищенной и может быть повреждена.

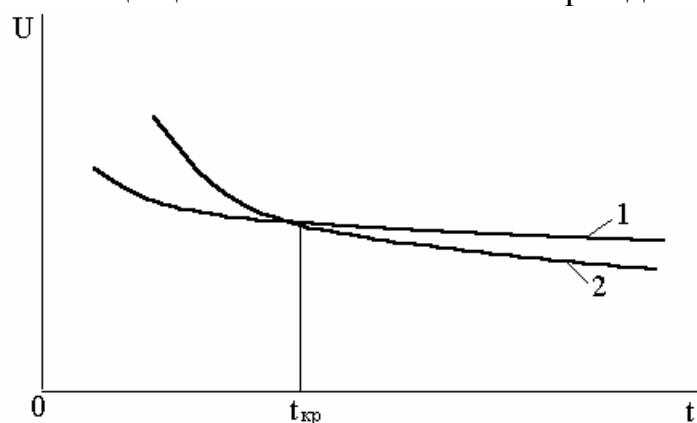


Рис. 1.1. ВСХ изоляции (нижняя огибающая –1) и ИП (верхняя огибающая –2)

Любые срабатывания искровых промежутков вызывают образование дуги тока короткого замыкания, которое в сетях с глухим заземлением нейтрали, а в ряде случаев и в сетях с изолированной нейтралью, самопроизвольно погаснуть не может. Каждое такое короткое замыкание вызывает нежелательные электродинамические воздействия в области трансформаторов и генераторов, ускоренный износ и внеочередные ревизии выключателей, допускающих ограниченное количество отключений токов короткого замыкания.

Срабатывание искровых промежутков, установленных параллельно защищаемой изоляции, вызывает резкий срез напряжения на ней. Это приводит к возникновению переходных процессов и опасных перенапряжений на продольной изоляции между витками и катушками обмоток трансформаторов, реакторов и электрических машин.

В настоящее время открытые искровые промежутки в качестве специальных защитных устройств применяются лишь в сетях с номинальным напряжением не выше 10 кВ. Однако, в сети любого напряжения в роли защитного промежутка может выступать изолятор воздушной линии, если его импульсная прочность окажется ниже амплитуды воздействующего напряжения. Например, при грозových разрядах амплитуда волны перенапряжения, движущейся от точки удара молнии, будет срезаться за счет перекрытий линейных изоляторов до тех пор, пока она не станет ниже импульсной прочности изоляторов. Это существенно облегчает решение задачи защиты подстанционного оборудования от воздействия набегающих по линиям грозových волн.

Некоторое улучшение характеристик может быть получено путем принудительного гашения дуги. Для этого искровые промежутки помещают в трубку из газогенерирующего материала. Такой защитный аппарат называется трубчатым разрядником (рис. 1.2). Разрядник имеет внешний искровой промежуток S_1 и внутренний S_2 , размещенный внутри трубки 1 из изолирующего газогенерирующего материала. Дугогашение обеспечивает промежуток S_2 , образованный между стержневым 2 и кольцевым 3 электродами. Промежуток S_1 служит для отделения газогенерирующей трубки от сети. Это позволяет избежать разложения материала трубки под влиянием тока утечки при длительном воздействии рабочего напряжения.

Искровые промежутки S_1 и S_2 пробиваются при появлении перенапряжений на фазном проводе. Через них протекает импульсный ток молнии и ток короткого замыкания рабочей частоты. Под действием высокой температуры дуги в трубке происходит интенсивное газовыделение и давление в ней нарастает до нескольких десятков атмосфер. Газы, выходя через открытый конец трубки, создают продольное дутье, и при первом же прохождении тока через нуль дуга гаснет.

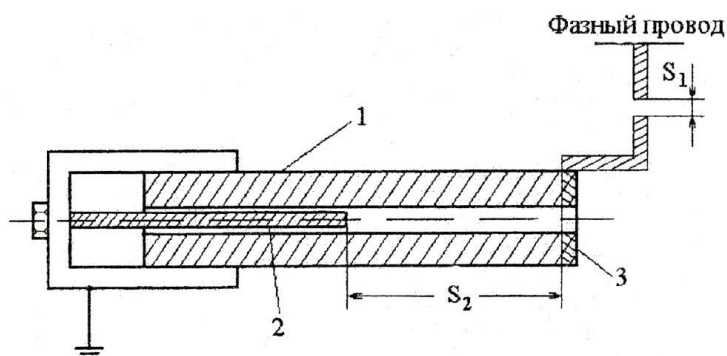


Рис. 1.2. Схема устройства и включения в сеть трубчатого разрядника

Трубчатые разрядники лишены одного из основных недостатков защитных искровых промежутков - образования длительного короткого замыкания, отключаемого сетевыми выключателями. Однако другие недостатки защитных промежутков (нестабильность вольт-секундных характеристик, наличие срезов напряжения) имеются и у трубчатых разрядников. Эти недостатки, а также наличие зоны выхлопа исключают возможность применения трубчатых разрядников в качестве основного аппарата для защиты подстанционного оборудования.

Учитывая перечисленные недостатки, а также большие эксплуатационные расходы на обслуживание трубчатых разрядников, в настоящее время их установка во вновь сооружаемых сетях не предусматривается.

Широкое распространение в сетях высокого напряжения нашли вентильные разрядники. Они состоят из искровых промежутков и последовательных нелинейных сопротивлений (рис. 1.3,а). В большинстве вентильных разрядников параллельно искровым промежуткам

присоединяются шунтирующие резисторы или емкости. Они дают возможность управлять распределением напряжения по большому числу последовательно соединенных искровых промежутков вентильных разрядников. Шунтирующие резисторы служат для создания более равномерного распределения напряжения рабочей частоты и внутренних перенапряжений между искровыми промежутками. Шунтирующие емкости могут использоваться как для выравнивания напряжения, так и для принудительного создания более неравномерного его распределения между искровыми промежутками при грозовых перенапряжениях, что позволяет снизить импульсное пробивное напряжение разрядников за счет каскадного пробоя искровых промежутков.

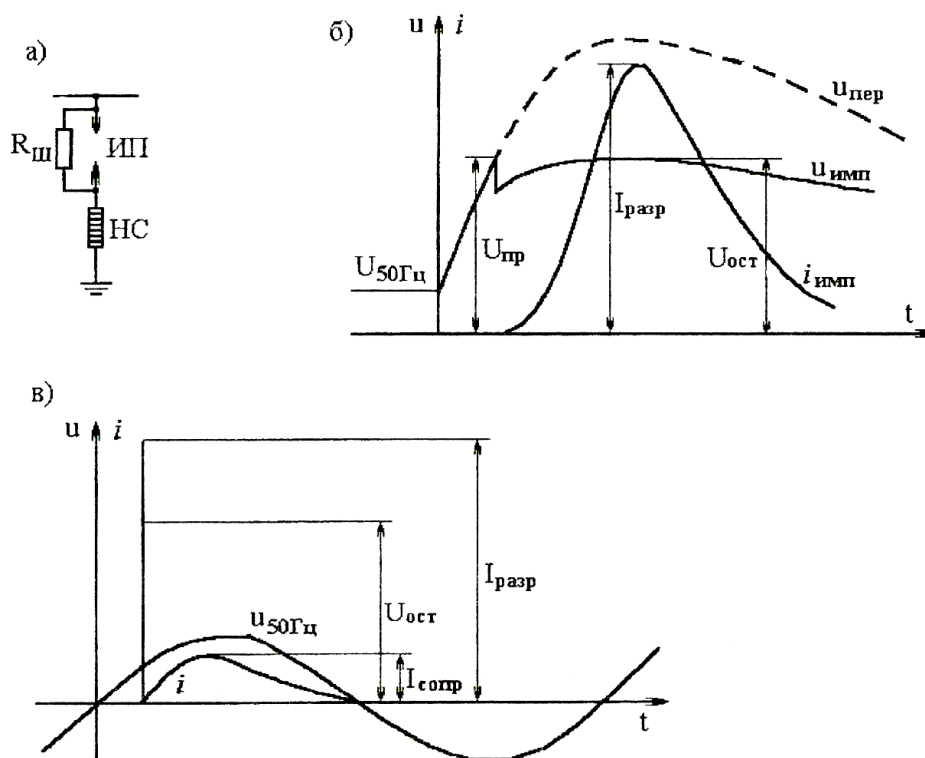


Рис. 1.3. Принципиальная схема вентильного разрядника (а), остающееся напряжение и импульсный ток при его срабатывании (б), напряжение промышленной частоты и сопровождающий ток (в)

При воздействии на вентильный разрядник перенапряжения $U_{пер}$, превышающего его пробивное напряжение $U_{пр}$ (рис. 1.3,б), происходит пробой искровых промежутков (ИП), и нелинейное последовательное сопротивление (НС) присоединяется к сети. После пробоя ИП действующее на изоляцию перенапряжение определяется в основном падением напряжения на НС (остающимся напряжением $U_{ост}$ на разряднике) вследствие протекания через него импульсного тока. Напряжение $U_{ост}$ на 20-30% должно быть меньше допустимого для защищаемой изоляции. Ток, протекающий через разрядник под действием напряжения промышленной частоты, называется сопровождающим током $I_{сопр}$ (рис.1.3,в). Он ограничивается нелинейным последовательным сопротивлением разрядника,

величина которого резко возрастает при снижении напряжения на разряднике. При переходе тока через нуль дуга в искровых промежутках гаснет, и разрядник приходит в исходное состояние.

Таким образом, искровые промежутки вентильных разрядников при отсутствии перенапряжений отделяют нелинейные последовательные сопротивления от сети и подключают их в момент появления опасных для изоляции перенапряжений. Искровые промежутки, по возможности, должны иметь горизонтальную вольт-секундную характеристику, т. е. малое изменение пробивного напряжения U_{np} в широком диапазоне предразрядных времен - от микросекунд до миллисекунд - и малый разброс U_{np} . Кроме того, U_{np} не должно изменяться после многократного пропускания нормированных импульсных и сопровождающих токов, а также при колебаниях температуры и воздействии тряски, ударов и вибрации. Искровые промежутки должны гасить дугу сопровождающего тока, как правило, при первом переходе его через нуль.

Для выполнения этих требований в вентильных разрядниках применяют многократные искровые промежутки, т. е. соединяют последовательно большое число единичных промежутков с малым зазором. Это позволяет использовать свойства короткой дуги с характерным для нее катодным падением напряжения в каждом промежутке после гашения сопровождающего тока. В вентильных разрядниках при наибольшем допустимом напряжении промышленной частоты на единичный искровой промежуток приходится от 1,0 до 1,7 кВ (действующее значение).

До последнего времени применялись искровые промежутки: с неподвижной дугой сопровождающего тока, которая гасится практически в том же месте, где происходит пробой; с дугой, вращающейся в кольцевом зазоре между электродами под действием магнитного поля, а также с растягивающейся дугой, которая, передвигаясь между электродами под действием магнитного поля, значительно (в десятки и сотни раз) увеличивает свою длину.

Искровые промежутки с неподвижной дугой использовались в разрядниках серий РВС, РВО (РВС - разрядник вентильный стационарный, РВО - разрядник вентильный облегченной конструкции). Их недостатком является малая дугогасящая способность (т. е. способность гасить дугу сопровождающего тока при первом переходе его через ноль). Для промежутков типа РВС ток I_{conp} не должен превышать 80... 100 А.

Увеличение I_{conp} может быть допущено при переходе к промежуткам с вращающейся дугой, которые применяются в магнитно-вентильных разрядниках серий РВМГ (разрядник вентильный магнитный грозовой) и РВМ (разрядник вентильный магнитный). Такой промежуток надежно гасит значительно большие сопровождающие токи (до 250 А). Это позволяет уменьшить величину нелинейного последовательного сопротивления, а следовательно, и остающееся напряжение разрядника, что приводит к существенному улучшению защитного коэффициента разрядника

$$k_3 = U_{ocm} / \sqrt{2}U_2,$$

где $U_{ост}$ - амплитуда остающегося напряжения на разряднике при протекании через него импульсного тока координации; U_2 - напряжение гашения сопровождающего тока разрядника (действующее значение).

Дальнейшее улучшение защитных свойств магнитно-вентильных разрядников было достигнуто при применении в них токоограничивающих искровых промежутков с растягиванием дуги сопровождающего тока и вводом ее в узкую щель, в которой происходит интенсивное охлаждение и деионизация дуги у стенок, в результате чего градиент напряжения на ней значительно увеличивается. Падение напряжения на дуге сопровождающего тока при ширине щели 1 мм составляет около 6 кВ/м. В начальный момент, когда через разрядник протекает импульсный ток, падение напряжения на промежутке пренебрежимо мало по сравнению с напряжением на нелинейном последовательном сопротивлении. Это позволяет применить сопротивление с меньшей нелинейностью, но с более высокой пропускной способностью или уменьшить сопровождающий ток разрядника. Защитные характеристики его улучшаются, повышается пропускная способность, уменьшаются габариты, вес и себестоимость производства разрядников.

Если для разрядников с искровыми промежутками типа РВС защитный коэффициент k_3 , составляет 2,5...2,7, то для разрядников с магнитным гашением - 2,0, т. е. при одинаковом напряжении гашения остающееся напряжение на 20...26% ниже (рис. 1.4). Величина k_3 для разрядников с токоограничивающими искровыми промежутками уменьшается до 1,6..1,8.

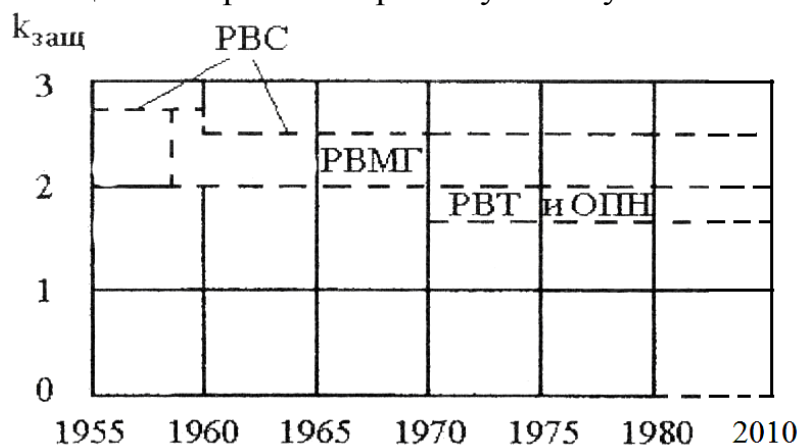


Рис. 1.4. Динамика улучшения защитного коэффициента вентильных разрядников и нелинейных ограничителей перенапряжений

Последовательное сопротивление (НС на рис.1.3,а) вентильного разрядника должно обладать нелинейной вольтамперной характеристикой и способностью многократно пропускать импульсные и сопровождающие токи. Оно ограничивает сопровождающий ток до величины, при которой искровые промежутки надежно гасят дугу. Поэтому при напряжении гашения величина НС должна быть, возможно, большей. С другой стороны, при протекании максимального импульсного тока необходимо иметь минимальное НС, для того чтобы остающееся на разряднике импульсное напряжение не превышало допустимого для изоляции.

Отсюда очевидно, что последовательное сопротивление не может быть линейным. Указанным условиям удовлетворяет нелинейное сопротивление, вольт-амперная характеристика которого имеет вид, показанный на рис. 1.5.

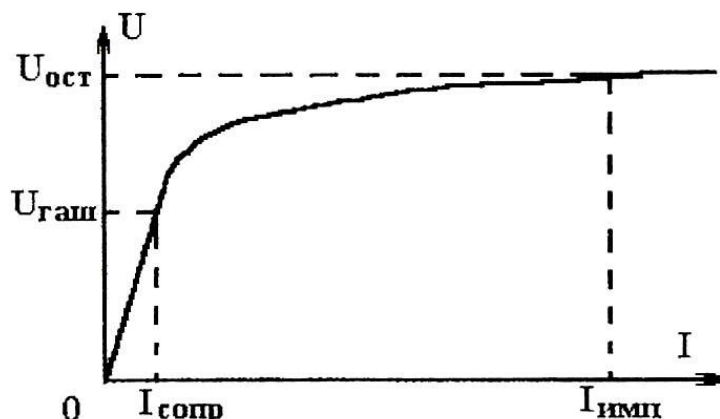


Рис.1.5. Вольт-амперная характеристика нелинейного последовательного сопротивления вентильного разрядника

При производстве нелинейных сопротивлений используют твердые полупроводниковые материалы, проводимость которых практически мгновенно возрастает при увеличении приложенного напряжения. Нелинейные сопротивления разрядников состоят из электротехнического карбида кремния (карборунда) SiC. Удельное сопротивление зерен карборунда составляет примерно 10^{-2} Ом·м. На их поверхности имеется полупроводящий запирающий слой толщиной -100 мкм из окиси кремния. Сопротивление запирающего слоя нелинейно зависит от напряженности электрического поля. При малых значениях оно составляет $10^4...10^6$ Ом·м и к нему прикладывается практически все напряжение. При повышении напряженности поля проводимость запирающего слоя резко возрастает и общее сопротивление резистора начинает определяться собственно зернами карборунда.

Нелинейные резисторы вентильных разрядников прессуются в виде дисков из исходной массы, состоящей из порошка карбида кремния и связующего материала. В настоящее время применяются диски из вилита и тервита. Вольт-амперную характеристику нелинейных резисторов приближенно принято характеризовать степенной зависимостью

$$U = CI^\alpha,$$

где C - постоянная, учитывающая свойства материала и размер резистора; α - показатель степени, который принято называть коэффициентом нелинейности материала, имеющий разные значения в области малых и больших токов.

Как следует из приведенной зависимости, вольт-амперную характеристику целесообразно строить в логарифмических шкалах, в которых она приближенно изображается отрезками прямых линий. На рис. 1.6 показана типичная вольт-амперная характеристика вилитовых дисков, которые применяются в разрядниках типа РВС.

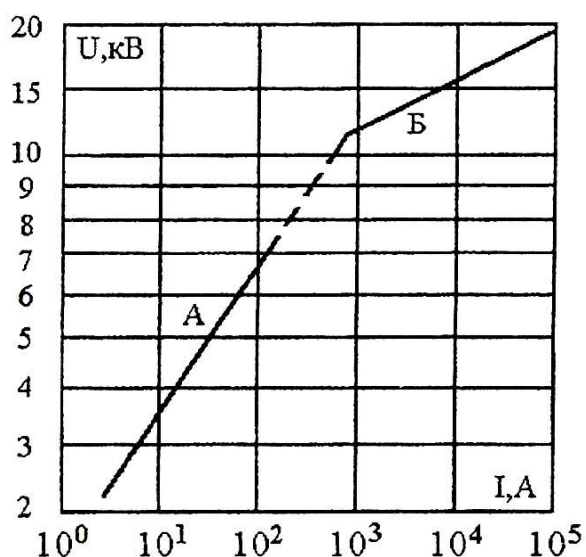


Рис. 1.6. Статическая вольт-амперная характеристика вилитового резистора высотой 60 мм и диаметром 100 мм на импульсах тока 20/40 мкс

Области больших токов, проходящих через разрядник при грозовых перенапряжениях, соответствует участок Б вольт-амперной характеристики. На этом участке коэффициент нелинейности α для вилита равен 0,1...0,2, для тервита - 0,15...0,25. Участок вольт-амперной характеристики соответствует области сопровождающих токов и большинству токов коммутационных перенапряжений. Коэффициент α для этого участка значительно выше: для вилита 0,28...0,3; для тервита - 0,35...0,38.

Вольт-амперная характеристика нелинейного сопротивления, состоящего из m последовательно включенных одинаковых резисторов, записывается в виде

$$U = m \cdot CI^\alpha.$$

Значения C и α различны для двух участков вольт-амперной характеристики. Вилитовые резисторы, имеющие относительно низкую пропускную способность, применялись в основном в грозозащитных разрядниках. Тервит обладает значительно большей пропускной способностью. В связи с этим разрядники с тервитовыми резисторами могут использоваться для защиты, как от грозовых, так и от коммутационных перенапряжений. Требования к характеристикам грозозащитных вентильных разрядников устанавливает ГОСТ 16357-83, согласно которому разрядники всех классов напряжения разделены на группы I, II, III, IV.

Увеличение номинального напряжения электрических сетей и необходимость снижения уровня изоляции оборудования требует глубокого ограничения перенапряжений. В то же время применяемые в настоящее время в эксплуатации вентильные разрядники с резисторами на основе карбида кремния вследствие недостаточной нелинейности материала не позволяют ограничить уровень перенапряжений ниже $2U_\phi$. Более глубокое их снижение требует уменьшения нелинейного последовательного сопротивления, что приводит к существенному увеличению

сопровождающих токов. Искровые промежутки не в состоянии погасить большие токи. Включение нелинейных сопротивлений под рабочее напряжение без искровых промежутков оказывается невозможным вследствие большого тока через нелинейное сопротивление при фазном напряжении. Применение искровых промежутков вызывает дополнительные трудности, связанные с необходимостью уменьшения сопровождающего тока до величины, надежно отключаемой промежутками, а также получения пологой вольт-секундной характеристики разрядника.

Значительное улучшение защитных характеристик разрядников может быть достигнуто при отказе от использования искровых промежутков. Это оказывается возможным при переходе к резисторам с резко нелинейной вольт-амперной характеристикой и достаточной пропускной способностью. Таким требованиям отвечают резисторы из полупроводникового материала на базе оксида цинка. Защитные аппараты, изготовленные из таких резисторов, носят название нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН).

Высоконелинейные оксидно-цинковые резисторы (варисторы) в настоящее время выпускаются в виде дисков диаметром от 28 до 115 мм. Вольт-амперные характеристики варисторов диаметром 28 мм приведены на рис. 1.7, где напряжение указано в относительных единицах, причем за базисную величину принято остающееся напряжение на варисторе при токе 100 А.

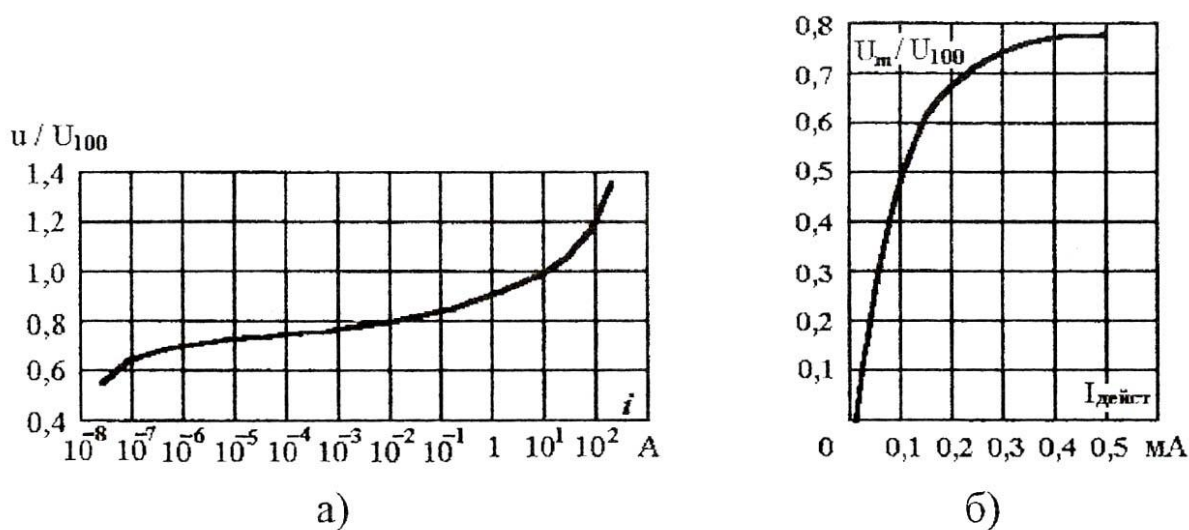


Рис. 1.7. Вольт-амперные характеристики оксидно-цинковых резисторов на постоянном токе и при импульсах (а) и на переменном токе частотой 50 Гц (б)

Вольт-амперную характеристику нелинейных резисторов, как уже отмечалось, обычно аппроксимируют зависимостью $U = CI^\alpha$, где α - коэффициент нелинейности материала. Малая величина α (0,015...0,04), определяющая преимущества оксидно-цинковых варисторов, охватывает область токов от 10^{-6} до 10^2 А. Протекание через варисторы токов, превышающих 500 А, нежелательно, поскольку в этом случае резко

возрастает коэффициент нелинейности ($\alpha \geq 0,1$). Зависимости усредненных значений параметров варисторов от тока приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Средние значения параметров C и α оксидно-цинковых варисторов

I, A	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	100	500	1500
U / U_{100}	0,7	0,74	0,78	0,82	0,86	0,91	1	1,1	1,3
α	0,2					0,03	0,04	0,06	0,1
C / U_{100}	0,86					0,9		0,93	0,96

Вольт-амперная характеристика варисторов (см. рис. 1.7) позволяет комплектовать нелинейные ограничители перенапряжений с улучшенными характеристиками без искровых промежутков.

Нелинейные ограничители перенапряжений, обладая лучшими защитными характеристиками по сравнению с вентильными разрядниками, так же, как и вентильные разрядники, оказываются не в состоянии обеспечить ограничение перенапряжений ниже некоторого минимального уровня. Это связано с особенностью нелинейных сопротивлений, изготовленных на основе оксида цинка. Их характеристики могут необратимо изменяться под действием длительно приложенного рабочего напряжения, если при этом ток через нелинейное сопротивление превосходит величину порядка нескольких десятых долей миллиампера.

Поэтому вольт-амперную характеристику ОПН приходится поднимать вверх по оси напряжения до тех пор, пока ток нормального рабочего режима не понизится до значения 0,1 мА. Технически это достигается путем увеличения числа последовательно соединенных элементов нелинейных сопротивлений. При этом пропорционально возрастают и все остальные ординаты вольт-амперной характеристики ОПН. Например, если при одинаковой толщине дисков ОПН 220 кВ будет иметь вдвое больше последовательных элементов по сравнению с ОПН 110 кВ, то и уровень ограничения грозовых перенапряжений при токе 5 кА у него будет в два раза выше, чем у ОПН 110 кВ, т. е. кратность ограничения перенапряжений при заданном токе через ОПН останется той же самой. Некоторого, весьма небольшого изменения крутизны вольт-амперной характеристики удастся достичь путем увеличения площади дисков нелинейных элементов или параллельного соединения нескольких цепочек из нелинейных элементов.

Для коммутационных перенапряжений уровнем ограничения считается напряжение, соответствующее некоторому характерному значению тока через ОПН на вольт-амперной характеристике (порядка сотен ампер). Для грозовых перенапряжений уровнем ограничения считается напряжение, соответствующее токам 5-20 кА:

Номинальное напряжение сети, кВ	35	110	150	220	330	500
Расчетный ток коммутационных импульсов, А	350	500	500	500	700	1200
Напряжение на ОПН при расчетном коммутационном токе (в долях амплитуды фазного напряжения)	4,05	2,0	2,0	2,0	1,93	1,84
Напряжение на ОПН при грозовом импульсе с током 5000 А (в долях амплитуды фазного напряжения)	4,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,1

2. Молниезащита линий

2.1. Задачи и критерии молниезащиты линий

Как уже отмечалось, воздушная линия ежегодно испытывает несколько десятков 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 с не успевшим деионизироваться газом, по которому под действием рабочего напряжения может продолжать течь ток промышленной частоты. В процессе ликвидации замыканий на линии, вызванных грозой, расходуется ресурс работы выключателей; трансформаторы и другое оборудование сети подвергаются электродинамическим и термическим воздействиям токов короткого замыкания. Существенная часть замыканий сопровождается дальнейшим развитием аварии, что требует отключения линии на длительный срок с возможным нарушением нормального электроснабжения потребителей.

Вероятность грозового отключения линии зависит от многих причин: интенсивности грозовой деятельности в районах, расположенных вдоль трассы линии, номинального напряжения сети, ее конструкции, материала опор и т. д. С повышением класса напряжения линии, как правило, увеличиваются ее длина, высота опор, а следовательно, и вероятность поражения линии молнией. Поэтому на линиях электропередачи высших классов напряжения, выполняемых на металлических и железобетонных опорах, обычно подвешивают грозозащитные тросы с малым углом защиты, обеспечивающим малую вероятность поражения молнией фазных проводов линии, а достаточно малое импульсное сопротивление заземления опор снижает вероятность обратных перекрытий с опоры на провод при ударе молнии в опору или трос вблизи опоры (рис. 2.1).

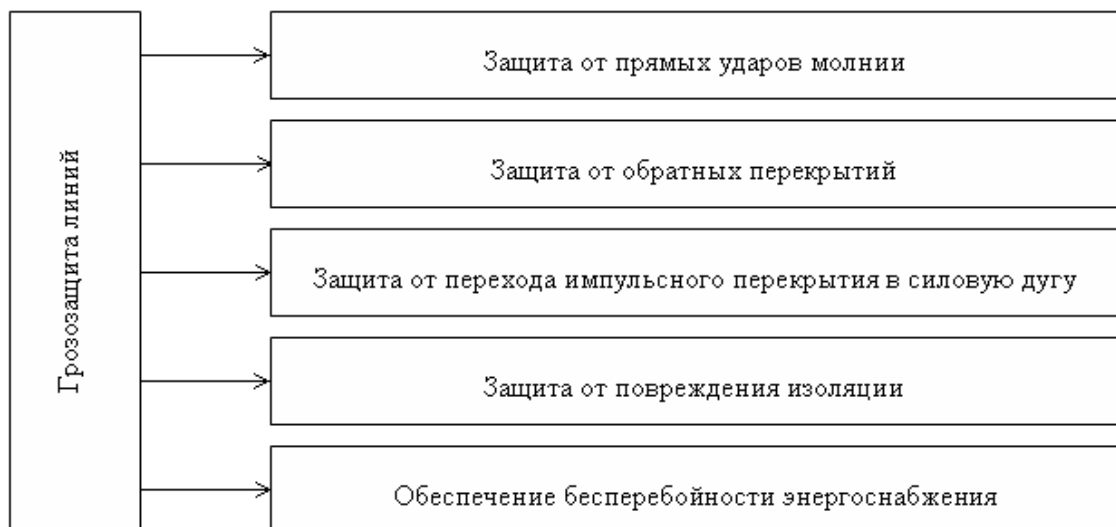


Рис. 2.1 Классификация задач грозозащиты ВЛ

В ряде случаев линии электропередачи выполняются на деревянных опорах. Грозозащитный трос на таких линиях не подвешивается, поэтому почти все удары молнии в линию попадают в фазные провода. При этом необходимая грозоупорность линии обеспечивается малой вероятностью перехода импульсного перекрытия междуфазной изоляции в силовую дугу, что связано с высокой скоростью восстановления электрической прочности промежутка.

На линиях средних классов напряжения 6-35 кВ, работающих в системе с изолированной нейтралью, часто используются металлические или железобетонные опоры. Применение грозозащитных тросов на таких линиях нецелесообразно, поскольку вследствие малой электрической прочности изоляции линии практически любой удар молнии в трос приводит к обратному перекрытию с троса на провод. Поэтому наиболее эффективными мерами, обеспечивающими грозоупорность таких линий, можно считать применение автоматического повторного включения линии (эта мера является резервной для линий электропередачи более высоких классов напряжения) и дугогасящей катушки, уменьшающих ток дуги однофазного замыкания на землю и увеличивающих вероятность самопроизвольного погасания дуги.

Для сравнения эффективности различных мероприятий по грозозащите линий электропередачи применяется ряд критериев.

Уровень грозоупорности. Под "уровнем грозоупорности" понимают тот наибольший расчетный ток I_M в хорошо заземленном объекте, возникающий вследствие прямого удара молнии типичной формы (например, косоугольная волна с фронтом $\tau_{\phi}=2$ мкс), при котором еще не перекрывается изоляция линии. По изменению уровня грозоупорности можно оценить влияние отдельного параметра схемы (например, сопротивления заземления опоры) на грозоупорность линии.

Кривая опасных токов молнии. При ударе молнии в вершину опоры или в трос вблизи опоры необходимо учитывать не один параметр, а несколько, например, сопротивление заземления опоры и ее индуктивность. При этом напряжение на гирлянде изоляторов будет зависеть не только от амплитуды I_m , но и от крутизны I'_m тока молнии. Связь между опасными сочетаниями I_m и I'_m отражается кривой опасных токов. Эта зависимость в отличие от уровня грозоупорности позволяет оценить влияние не одной, а двух характеристик линии (например, сопротивления заземления и индуктивности опоры) на надежность грозозащиты.

Показатель надежности грозозащиты. С помощью показателя надежности грозозащиты можно получить приближенную оценку числа лет безаварийной работы, т. е. величину, обратную математическому ожиданию числа отключений линии в год - $\tau = 1/n_{\Sigma}$. Показатель τ позволяет сравнить эффективность различных грозозащитных мероприятий и схем (например, грозоупорность различных типов линий на разных опорах, с тросами и без тросов, влияние эффективности АПВ и т. д.).

2.2. Молниезащита воздушных линий различных классов напряжения

При оценке показателя надежности грозозащиты линии (или обратной величины – среднего числа грозовых отключений линий в год - n_{Σ}) учитывается зависимость перекрытия линии от законов распределения амплитуды и крутизны токов молнии, а также от места удара молнии. Поэтому эффективность грозозащиты сначала определяют отдельно для следующих расчетных случаев поражения линии (рис.2.2):

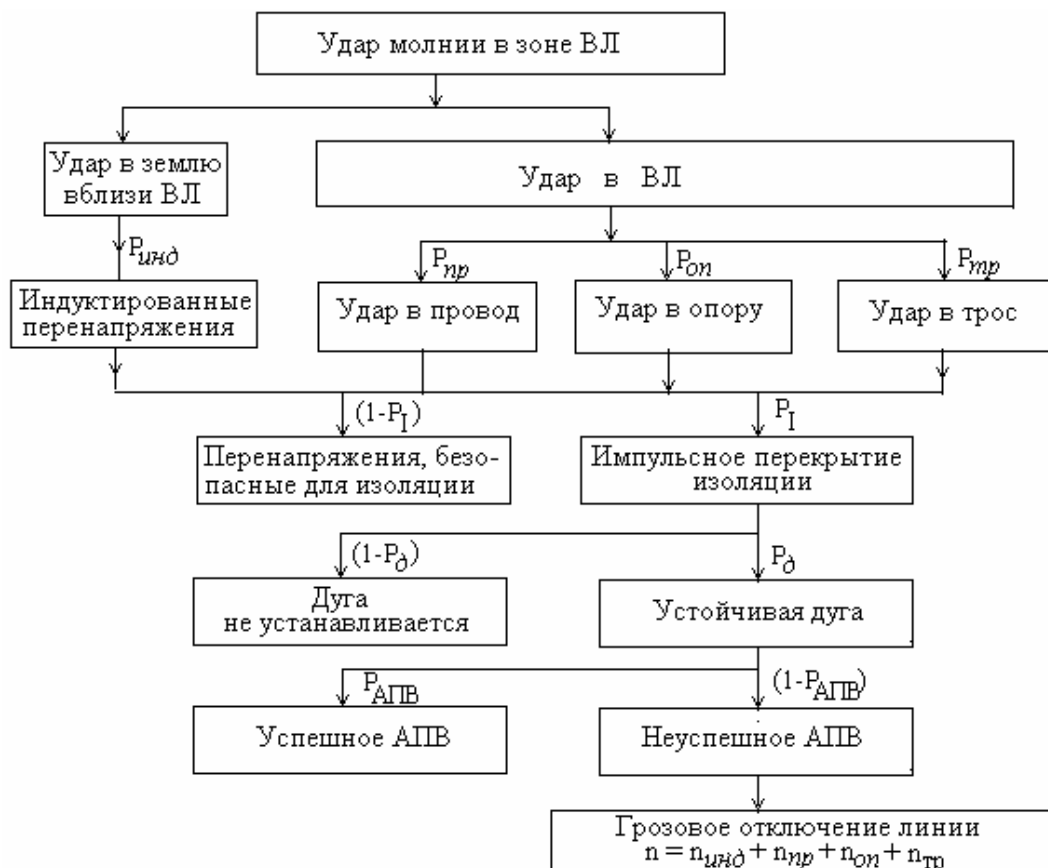


Рис.2.2. Логическая схема развития грозовых аварий ВЛ 110 кВ и выше

- 1) удар молнии в провод с последующим перекрытием изоляции между проводом и опорой или между проводами;
- 2) удар молнии в вершину опоры с последующим перекрытием изоляции между опорой и проводом;
- 3) удар молнии в пролет троса с последующим перекрытием изоляции с троса на провод или на землю;
- 4) удар молнии вблизи линии электропередачи, сопровождающийся появлением индуктированных перенапряжений.

Удар молнии в провод во многих случаях вызывает прямое перекрытие гирлянды изоляторов, что может привести к отключению линии. При ударе молнии в грозозащитный трос вблизи опоры практически весь ток первоначально устремляется в землю через эту опору, и такой случай можно рассматривать как удар молнии непосредственно в опору. Удар молнии в

среднюю часть пролета троса приводит к распределению тока между соседними опорами, что облегчает условия работы гирлянд изоляторов. Однако при этом на тросе в месте удара могут возникнуть перенапряжения, создающие опасность перекрытия воздушного промежутка между тросом и проводом в середине пролета. При ударе молнии вблизи линии, возникающие индуктированные перенапряжения существенно влияют только на число грозовых отключений линий напряжением до 110 кВ.

Рассчитав число грозовых отключений линии при каждом из перечисленных воздействий можно определить суммарное число грозовых отключений в год

$$n_{\Sigma} = n_{\text{пр}} + n_{\text{о}} + n_{\text{тр}} + n_{\text{инд}},$$

где $n_{\text{пр}}$, $n_{\text{о}}$, $n_{\text{тр}}$ – число отключений при ударах молнии в провод, в опору и трос; $n_{\text{инд}}$ – число отключений линии вследствие индуктированных перенапряжений.

Число отключений ВЛ 110 кВ и выше для перечисленных расчетных случаев определяется по формулам:

$$\begin{aligned} n_{\text{пр}} &= N_{\text{пум}} \cdot P_{\text{пр}} \cdot P_{\text{Iпр}} \cdot P_{\text{д}} \cdot (1 - P_{\text{АПВ}}); \\ n_{\text{о}} &= N_{\text{пум}} \cdot P_{\text{оп}} \cdot P_{\text{Iоп}} \cdot P_{\text{д}} \cdot (1 - P_{\text{АПВ}}); \\ n_{\text{тр}} &= N_{\text{пум}} \cdot P_{\text{тр}} \cdot P_{\text{Iтр}} \cdot P_{\text{д}} \cdot (1 - P_{\text{АПВ}}); \\ n_{\text{инд}} &= N_{\text{инд}} \cdot P_{\text{д}} \cdot (1 - P_{\text{АПВ}}), \end{aligned}$$

где $N_{\text{пум}}$ – число прямых ударов молнии в линию (провода, тросы, опоры); $P_{\text{пр}}$ – вероятность прорыва молнии на фазные провода мимо тросов (при отсутствии тросов $P_{\text{пр}}=1$); $P_{\text{оп}}$ – вероятность ударов в опору, $P_{\text{тр}}$ – то же в трос; $P_{\text{Iпр}}$, $P_{\text{Iоп}}$, $P_{\text{Iтр}}$ – вероятность перекрытия гирлянды при ударе молнии в провода, опору и трос соответственно, $P_{\text{д}}$ – вероятность установления дуги при перекрытии, $P_{\text{апв}}$ – вероятность успешности АПВ, $N_{\text{инд}}$ – ожидаемое годовое количество опасных индуктированных перенапряжений с амплитудой, превышающей импульсную прочность изоляции при положительной полярности.

Подвеска грозозащитных тросов, являющаяся основным грозозащитным мероприятием на линиях классов напряжения 110 кВ и выше, малоэффективна для линий 6-35 кВ, что вызвано низкой импульсной прочностью изоляции 6-35 кВ. Вследствие этого вероятность обратных перекрытий при ударах молнии в опору или в трос оказалась бы, при обычных значениях сопротивления заземления опор, весьма значительной. Поэтому линии 6 - 35 кВ сооружаются, как правило, без тросов. Исключение составляют лишь особо ответственные линии 35 кВ на металлических опорах.

Несмотря на отсутствие тросов линии 6-35 кВ имеют ряд особенностей, создающих более благоприятные условия для их грозозащиты. Во-первых, эти линии реже подвергаются прямым ударам молнии из-за их относительно небольшой высоты и протяженности. Нередко они оказываются частично защищенными от прямых ударов молнии расположенными вблизи линии возвышающимися объектами: зданиями, высокими деревьями, линиями более высокого напряжения и т. п.

Во-вторых, наличие изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтрали в сетях 6-35 кВ облегчает борьбу с последствиями импульсных перекрытий изоляции, способствует гашению дуги однофазного замыкания на землю. Можно считать, что случаи грозových перекрытий изоляции только одной из фаз линии не вызывают ее отключения. Возникшая дуга однофазного перекрытия гаснет, и опасность для линий 6-35 кВ представляют лишь перекрытия между фазами или одновременные перекрытия с нескольких фаз на землю. При междуфазных перекрытиях остается высокой вероятность погасания дуги, потому что градиент рабочего напряжения вдоль пути перекрытия на этих линиях невелик.

В-третьих, линии 6 - 35 кВ часто сооружаются на деревянных опорах. В этом случае длина пути грозового перекрытия изоляции увеличивается за счет импульсной прочности дерева траверсы и стойки опоры. Уменьшается вероятность перекрытия и вероятность перехода импульсного перекрытия в дугу короткого замыкания. Однако эти преимущества деревянных опор не удается реализовать в полной мере из-за возможности расщепления деревянных частей при прямых ударах молнии. Для борьбы с расщеплением траверс и стоек опор в ряде случаев приходится шунтировать деревянные части опор токоотводящими металлическими спусками.

В отличие от линий более высоких классов напряжения, линии 6 - 35 кВ на металлических и железобетонных опорах часто отключаются вследствие воздействия индуктированных перенапряжений. Расчеты показывают, что число индуктированных перенапряжений, способных вызвать перекрытие изоляции 35 кВ, в пять раз больше, чем число перенапряжений, опасных для сети 110 кВ. Причиной этого также является невысокая импульсная прочность изоляции линий 6- 35 кВ на металлических и железобетонных опорах.

При отсутствии тросов основными грозозащитными мероприятиями на линиях 6-35 кВ являются использование дугогасящего реактора (или изолированной нейтрали) и АПВ. Даже при отсутствии тросов на линиях 35 кВ целесообразно предусматривать снижение импульсного сопротивления заземления опор, поскольку это уменьшает число обратных перекрытий с опоры на соседние фазы.

В целях защиты отдельных мест с ослабленной изоляцией или с повышенными требованиями к надежности защиты (пересечение с другими линиями или транспортными магистралями, подходы линий к подстанциям или переключательным пунктам и т. п.) на линиях 6 - 35 кВ используются различные разрядники.

Последовательность событий при грозовом поражении линии 6 - 35 кВ показана на рис. 2.3. Рассмотрим сначала последствия прямого удара молнии в один из фазных проводов линии с металлическими или железобетонными опорами. Если ток молнии окажется выше уровня грозоупорности линии I_{M1} , происходит перекрытие изоляции пораженной фазы на одной или нескольких

ближайших к точке удара опорах. Величину I_{M1} можно определить так же, как и для линий высших классов напряжения:

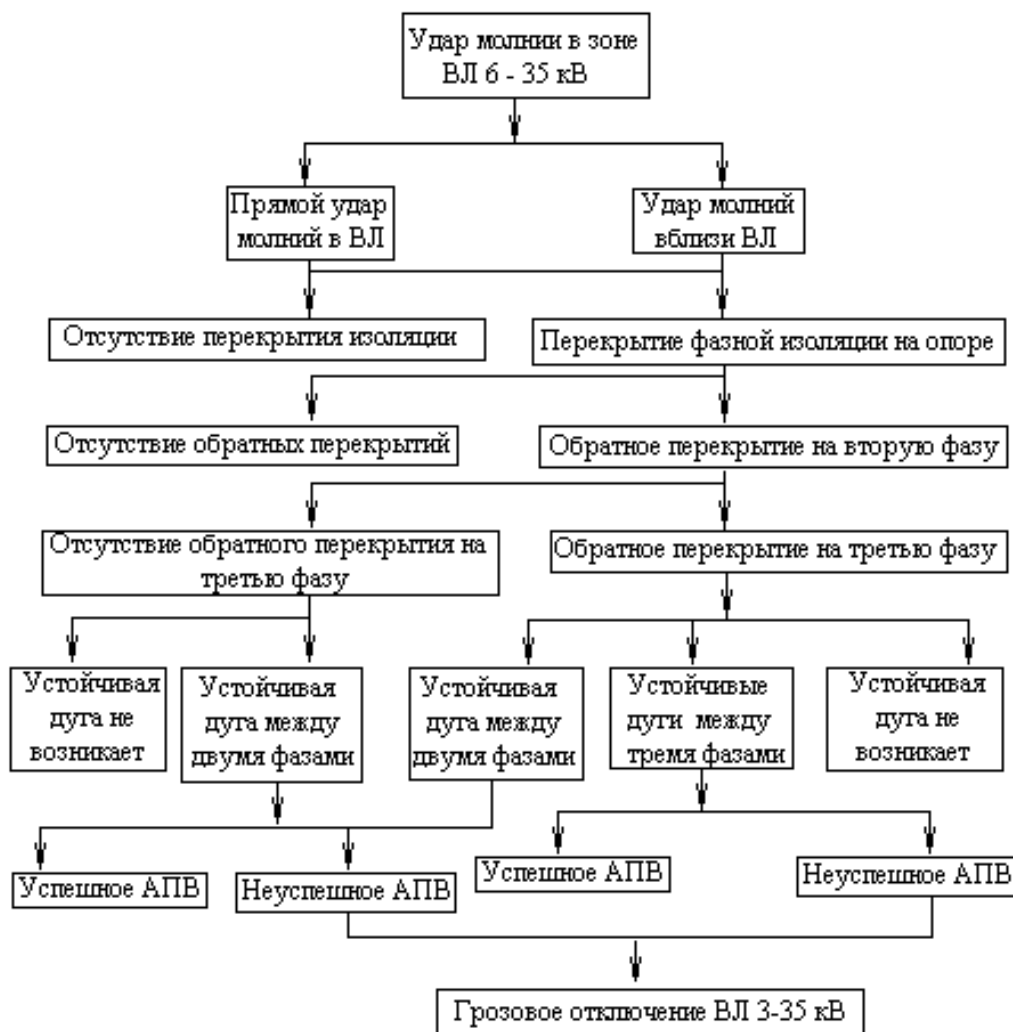


Рис. 2.3. Логическая схема развития грозовых аварий ВЛ 6 – 35 кВ.

$$I_{M1} = U_{50}^- / z_{\phi 1},$$

где $U_{50}^- / z_{\phi 1}$ - импульсное 50%-ное разрядное напряжение фазной изоляции на опоре; $z_{\phi 1} = z_M \parallel 0,5 \cdot z_{\text{ПР}}$ - эквивалентное сопротивление в точке удара молнии.

Однако, как было отмечено выше, однофазное перекрытие для линий 6 - 35 кВ обычно не приводит к отключению линии и может не учитываться при оценке общего числа отключений. Короткое замыкание, требующее отключения линии, может возникнуть лишь в том случае, если ток молнии превысит величину $I_{M2} > I_{M1}$, при которой возможно обратное перекрытие с опоры на другие фазы. Величину I_{M2} можно определить по формуле, аналогичной формуле I_{M1} , причем роль грозозащитного троса в данном случае играет провод пораженной молнией фазы. Индуктивными составляющими напряжения на опоре и рабочим напряжением допустимо пренебречь. При этом получаем:

$$I_{M2} = U_{50}^+ / z_{\vartheta 2} \cdot (1 - k_{12}),$$

где $z_{\vartheta 2} = z_M \parallel 0,5 \cdot z_{II} \parallel R_{3II}$ - эквивалентное сопротивление в точке удара молнии; k_{12} - коэффициент связи между пораженной фазой и наиболее удаленной от нее соседней фазой.

После обратного перекрытия на одну из соседних фаз напряжение на опоре несколько снижается за счет отвода части тока молнии во вновь перекрытую фазу. Волновое сопротивление фазных проводов, по которым происходит отвод части тока молнии от опоры, становится равным $z_{III}(1 + k_{12})/4$. При дальнейшем возрастании тока молнии до величины I_{M3} происходит обратное перекрытие и на третью фазу линии. Аналогично предыдущему случаю получаем

$$I_{M3} = U_{50}^+ / z_{\vartheta 3} (1 - k_{12-3}),$$

где $z_{\vartheta 3} = z_M \parallel R_{3II} \parallel z_{III}(1 + k_{12})/4$ - эквивалентное сопротивление в точке удара молнии при перекрытии двух фаз линии; k_{12-3} - коэффициент связи двух ранее перекрытых фаз, соединенных параллельно, с третьей фазой.

Случаи двухфазного и трехфазного перекрытия характеризуются различными вероятностями перехода импульсного перекрытия в короткое замыкание. Для двухфазного перекрытия эта вероятность P_d может быть приближенно определена по формуле

$$P_d = 1,6 \cdot U_{раб.} / \ell_{пер} - 0,06,$$

где $U_{раб.}$ - эффективное значение рабочего напряжения вдоль пути перекрытия, кВ; $\ell_{пер}$ - суммарная длина пути импульсного перекрытия.

Предполагается, что рассчитанное значение P_d имеет место при горении только одной дуги, а при наличии дуг на соседних промежутках (с другими источниками рабочего напряжения) их гашения являются независимыми событиями. При этом вероятность установления хотя бы одной дуги при трехфазном перекрытии можно приближенно оценить по формуле:

$$P_{d\Sigma} = 2 \cdot P_d \cdot (1 - P_d) + P_d^2 = P_d \cdot (2 - P_d).$$

Вслед за установлением дуги приходит в действие АПВ, которое с вероятностью $P_{АПВ}$ ликвидирует последствия грозового перекрытия. Согласно опыту эксплуатации, для линий 6 - 10 кВ $P_{АПВ} \approx 0,54$, а для линий 35 кВ $P_{АПВ} \approx 0,7$.

Удельное число грозовых отключений линии от прямых ударов молнии составит

$$n_{ПВМ} = N_{ПВМ}^* \cdot [P_{II3} \cdot P_{d\Sigma} + (P_{II2} - P_{II3}) \cdot P_d] \cdot (1 - P_{АПВ}),$$

где $P_{II2} = \exp(-0,04I_{M2})$ - вероятность двухфазного перекрытия; $P_{II3} = \exp(-0,04I_{M3})$ - вероятность трехфазного перекрытия.

Линии на деревянных опорах без токоотводящих спусков имеют более высокую грозоупорность, поскольку увеличенная импульсная прочность изоляции затрудняет развитие междуфазных перекрытий. Возникновение импульсного перекрытия с пораженной фазы на землю вдоль деревянной

опоры облегчает условия для развития междуфазных перекрытий: междуфазная изоляция при этом частично шунтируется. Для линий 6 - 10 кВ на деревянных опорах уровень грозоупорности I_{M3} (рассчитанный в предположении, что уже произошло перекрытие опоры) может оказаться меньше I_{M1} . Это означает, что каждое перекрытие с пораженной фазы на землю сразу же переходит в трехфазное перекрытие, и расчет удельного числа отключений можно проводить по формуле:

$$n_{ПУМ} = N_{ПУМ}^* \cdot P_{П1} \cdot P_{Д\Sigma} \cdot (1 - P_{АПВ}), \text{ где } P_{П1} = \exp(-0,04I_{M1}).$$

Рассмотрев методику оценки числа отключений линии от прямых ударов молнии, обратимся к анализу воздействия индуктированных перенапряжений. Их удельное число, в зависимости от амплитуды $U_{инд}$, определяется формулой:

$$N_{инд} = \frac{9,36 \cdot T_{\text{ч}} \cdot h_{\text{ср}}}{U_{инд}} \cdot e^{-\frac{U_{инд}}{260}}, \quad (2.1)$$

где $T_{\text{ч}}$ - число грозových часов; $h_{\text{ср}}$ - средняя высота верхнего провода; $U_{инд}$ - амплитуда индуктированных перенапряжений.

Полагая в этой формуле $U_{инд} = U_{50}^+$, имеем удельное число междуфазных перекрытий от индуктированных перенапряжений $N_{инд}$.

В отличие от случаев прямого удара, индуктированные перенапряжения возникают одновременно на всех трех фазах линии с приблизительно одинаковой амплитудой, что затрудняет пробой междуфазной изоляции до перекрытия с фазы на землю. Расчеты показывают, что перекрытие на землю деревянной опоры практически всегда создает условия для одновременного перекрытия всех фаз. В этом случае удельное число отключений линии вследствие индуктированных перенапряжений составит

$$n_{инд} = N_{инд} \cdot P_{Д\Sigma} \cdot (1 - P_{АПВ}).$$

На металлических опорах перекрытие одной из фаз приводит к увеличению разности напряжений между перекрытой и непокрытой фазами. На перекрытой фазе напряжение снижается до величины

$$U_1 = U_{инд} R_{3И} / (R_{3И} + 0,5z_{ПР}),$$

а на непокрытой — до величины

$$U_2 = U_{инд} + k_{12}(U_1 - U_{инд}).$$

Перекрытие между фазами произойдет, если разность $U_2 - U_1$ превысит импульсную прочность междуфазной изоляции. Величины индуктированных перенапряжений, при которых становятся возможными двухфазные и трехфазные перекрытия, записываются соответственно в виде

$$U_{инд2} = U_{50}^+ \cdot \frac{R_{3И} + 0,5z_{ПР}}{(1 - k_{12}) \cdot 0,5z_{ПР}}$$

и

$$U_{инд3} = U_{50}^- \cdot \frac{R_{3И} + z_{ПП} \cdot \frac{1+k_{12}}{4}}{(1-k_{12-3}) \cdot z_{ПП} \cdot \frac{1+k_{12}}{4}}$$

Удельное число отключений линии вследствие индуктированных перенапряжений

$$n_{инд} = [N_{инд3} \cdot P_{Д\Sigma} + (N_{инд2} - N_{инд3}) \cdot P_{Д}] \cdot (1 - P_{АПВ}),$$

где $N_{инд2}$ и $N_{инд3}$ удельные числа двухфазных и трехфазных перекрытий, определяемые по формуле (2.1) при $N_{инд} = N_{инд2}$ и $N_{инд} = N_{инд3}$ соответственно.

Высокую надежность грозозащиты воздушных линий электропередачи обеспечивают следующие мероприятия:

- подвеска грозозащитных тросов с достаточно малыми углами защиты;
- снижение импульсного сопротивления заземления опор;
- повышение импульсной прочности изоляции линий и снижение вероятности установления дуги (в частности, использование деревянных траверс и опор);
- применение изолированной нейтрали или дугогасящего реактора;
- использование автоматического повторного включения линий.

Рассчитанные удельные числа грозовых отключений при различных видах поражения линии показывают, что порядок полученных оценок суммарного удельного числа отключений n_{Σ} в основном согласуется с данными на основе опыта эксплуатации (табл. 2.1 и рис. 2.4).

Линии 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 α . Угол защиты, в зависимости от высоты опор подбирается таким образом, чтобы уменьшить число прямых ударов молнии в фазные провода приблизительно на 2-3 порядка. Это условие обеспечивается обычно при $\alpha=20...30^\circ$. Тем не менее, как показывает опыт эксплуатации, случаи прорыва молнии на провода являются определяющими в суммарном числе опасных грозовых поражений линий 330 кВ и выше, и наблюдается увеличение их числа с ростом номинального напряжения линии. Это связано с увеличением высоты опор и соответствующим снижением эффективности тросовой защиты, а также с возрастанием влияния электрического поля фазных проводов на направление развития лидера молнии. В целях сохранения высокой надежности тросовой защиты на линиях СВН и УВН рекомендуется применение тросов с отрицательными углами защиты.

Для уменьшения грозопоражаемости линии СВН чаще монтируют на опорах, имеющих горизонтальное расположение фаз (например, порталных). Это позволяет снизить общую высоту линий. Дополнительное снижение числа обратных перекрытий дает также использование опор, закрепленных металлическими оттяжками, которые уменьшают

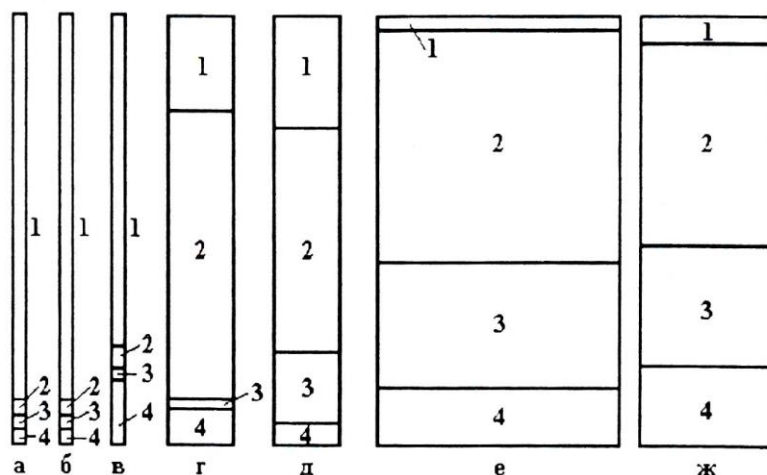


Рис.2.4. Диаграмма вероятного числа отключений линий разных классов напряжения (n_{Σ}) на 100 км и 100 грозовых часов:

По вертикали - относительное распределение между количеством отключений в провод, опору, трос и землю; по горизонтали - суммарное число отключений n ; 1 - прорывы молнии на провод $n_{пр}$; 2 - удары молнии в вершину опоры $n_о$; 3 - удары молнии в пролет троса $n_{тр}$; 4 - индуктированные перенапряжения $n_{инд}$; а - ВЛ- 750 кВ, 1 цепь; б - ВЛ-500 кВ, 2 цепи; в - ВЛ-330 кВ, 1 цепь; г - ВЛ-220 кВ- 2 цепи; д - ВЛ-220 кВ, 1 цепь; е - ВЛ-110 кВ, 2 цепи; ж - ВЛ-110 кВ, 1 цепь

Таблица 2.1

Характеристики грозозащиты ВЛ 110-750 кВ.

Номинальное напряжение U_n , кВ	110	110	220	220	330	500	750
Материал опор	ж/бетон	металл	металл	металл	металл	металл	металл
Марка проводов	АС-120	АС-150	АСО-330	АСО-330	2АСО-400	3АСО-400	4АСУ-400
Количество и тип изоляторов на опоре	8ПС6-Б	8ПС 6-Б	14ПС 6-Б	14ПС 6-Б	22ПС 6-Б	28ПС 12-А	2×41ПС 12-А
Защитный угол троса α , град.	31,2	20,7	29,0	24,2	22,6	22,7	24,7
Импульсное сопротивление заземления опор $R_{зп}$, Ом	20	15	15	10	10	10	10
Удельное число прямых ударов молнии в год при $T_q = 100$ ч и $\ell = 100$ км, $N_{пвм}$, уд/100 км·100 ч	100	165	182	227	153	174	207
Удельное число отключений линии в год при ударе молнии в провод $n_{пр}$, 1/год	0,06	0,06	0,23	0,18	0,22	0,11	0,063
Удельное число отключений линии в год при ударе в опору $n_о$, 1/год	0,81	1,73	0,41	0,45	0,002	<0,001	<0,001
Удельное число отключений линии в год при ударе в трос, $n_{тр}$ 1/год	0,43	0,89	0,13	<0,01	<0,001	<0,001	<0,001
Удельное число отключений линии в год вследствие индуктированных перенапряжений $n_{тр}$, 1/год	0,25	0,38	0,03	0,04	0,003	<0,001	<0,001
Удельное число грозовых отключений линии в год n_{Σ} , 1/год	1,55	3,06	0,80	0,68	0,23	0,11	0,066

индуктивность пути тока молнии от вершины опоры в землю и импульсное сопротивление заземления.

На порталных опорах, имеющих большое расстояние между крайними фазами, достаточно малый угол защиты обеспечивается путем подвески двух тросов, расположенных на одинаковой высоте.

При заземлении троса на каждой опоре возникают замкнутые контуры, в которых под влиянием магнитного поля рабочего тока наводятся э.д.с., и начинают протекать паразитные токи. Для уменьшения связанных с этим потерь электрической энергии тросы непосредственно присоединяют к заземленной опоре лишь на конце анкерного участка, а на промежуточных опорах подвешивают на одном- двух изоляторах, зашунтированных искровым промежутком. При грозовых перенапряжениях эти искровые промежутки пробиваются, и трос оказывается практически заземленным на каждой опоре.

Для эффективного отвода тока молнии в землю и предотвращения обратных перекрытий изоляции опоры линии снабжаются соответствующими заземлителями, снижающими импульсное сопротивление заземления каждой опоры до значения $R_{зи} \leq 10 \dots 20$ Ом. Более высокие значения сопротивления заземления опор допускаются лишь для линий, расположенных в районах с высоким удельным сопротивлением грунта ($\rho > 1000$ Ом·м). В грунтах с $\rho > 1000$ Ом·м желательно применять эффективные глубинные заземлители или, в крайнем случае, многолучевые заземлители длиной 20-30 м.

Дополнительным средством уменьшения грозопоражаемости линий 220 кВ и выше является использование АПВ.

Комплекс перечисленных средств обеспечивает сравнительно высокий уровень надежности грозозащиты линий СВН: удельное число грозовых отключений составляет 0,05...0,1 на 100 км и 100 гр.ч. Следует отметить, что наиболее высокое удельное число грозовых отключений (на порядок большее, чем для других линий) имеют двухцепные линии, смонтированные на опорах башенного типа. Большая высота опор обуславливает на этих линиях увеличение вероятности прорыва молнии мимо тросов, а также увеличение вероятности обратных перекрытий за счет роста индуктивности опоры (рис. 2.4).

Линии 110-150 кВ на металлических или железобетонных опорах в большинстве случаев также защищаются по всей длине тросами. Угол защиты для этих линий обычно выбирается в пределах 20-30°, что при относительно небольших высотах и длинах этих линий, обеспечивает удовлетворительную надежность защиты (см. табл. 2.1). Однако нередко линии 110 кВ эксплуатируются и без тросовой защиты. К таким случаям относятся: а) прохождение линии в районах со слабой интенсивностью грозовой деятельности ($T_q < 20$ ч); б) высокое удельное сопротивление грунта, не позволяющее обеспечить малое сопротивление заземления опор и эффективную работу троса; в) расположение линий в особо гололедных районах, где часто наблюдается пляска проводов и большие механические

нагрузки на трос при обледенении создают опасность обрыва троса; г) наличие на трассе линии районов с агрессивными уносами промышленных предприятий, вызывающими быструю коррозию тросов и опасность их обрыва; д) расположение линии в горной местности, где разряды с большими токами молнии редко достигают проводов линии, ориентируясь преимущественно на возвышающиеся поблизости горные массивы.

Отсутствие грозозащитного троса приводит к повышению числа коротких замыканий на линии вследствие грозových перекрытий. При этом часто срабатывают устройства АПВ и увеличивается число опасных влияний на линии связи и число воздействий токов коротких замыканий на электрооборудование сети. Возрастает также и вероятность протекания больших токов через заземляющие устройства подстанции. Несмотря на это, с технико-экономической точки зрения отсутствие тросов на линиях 110-150 кВ на металлических опорах в ряде случаев оказывается оправданным, а грозозащита оказывается удовлетворительной благодаря относительно небольшому высоте и длине таких линий.

Линии 110-150 кВ на деревянных опорах не требуют подвески грозозащитных тросов, достаточная грозоупорность этих линий обеспечивается высокой импульсной прочностью линейной изоляции и малым градиентом напряжения вдоль пути перекрытия, обуславливающим малую вероятность перехода импульсного перекрытия в силовую дугу. Если на линии некоторые опоры выполнены металлическими или железобетонными (например, угловые или анкерные), то на них должны устанавливаться вентильные разрядники или ОПН.

Важным средством повышения надежности грозозащиты линий 110-150 кВ на деревянных опорах является применение АПВ.

При грозových поражениях линии на деревянных опорах наблюдаются расщепления и поломки траверс, а также других частей опоры. Число таких повреждений сильно зависит от качества подготовки древесины при сооружении ЛЭП; необходима тщательная и глубокая пропитка опор для предотвращения их загнивания.

Линии 35 кВ на металлических опорах защищаются тросами лишь в особо ответственных случаях. Обычно они и без тросов оказываются грозоупорными. Как отмечалось выше, основными грозозащитными мероприятиями здесь являются использование изолированной нейтрали или дугогасящего реактора, а также АПВ. Как видно из таблицы 8.2, где приведены типовые характеристики линий 6-35 кВ и оценки удельного числа грозových отключений при разных расчетных воздействиях, для линий 35 кВ на металлических опорах уже существенная доля отключений определяется индуктированными перенапряжениями.

Линии 35 кВ на деревянных опорах имеют более высокую надежность грозозащиты за счет использования высокой импульсной прочности дерева. Приведенные в таблице 2.2 оценки их удельного числа отключений имеют ориентировочный характер, поскольку импульсная прочность дерева, по литературным данным, может изменяться в два-три раза в зависимости от

степени увлажнения и состояния древесины. Кроме того, сопротивление заземления железобетонных пасынков на деревянных опорах, не имеющих токоотводящих спусков, не нормируется, что может привести к большому разбросу его значений на реальной линии.

Таблица 2.2

Характеристики грозозащиты ВЛ 6-35 кВ.

Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	6	6	35	35
Материал опор	дерево	ж/бетон	дерево	металл
Марка проводов	АС-50	АС-70	АС-95	АС-120
Количество и тип изоляторов на опоре	ШС10-А	ШС10-А	2ПС6-Б	3ПС6-Б
Импульсное сопротивление заземления опор $R_{зи}$, Ом	40	40	30	20
Удельное число прямых ударов молнии в год при $T_q = 100$ ч и $\ell = 100$ км, $N_{пум}$, уд/100 км·100 ч	55	50	66	96
Удельное число отключений линии в год при ударах молнии $n_{пум}$, 1/год	3,6	13,0	0,55	7,9
Удельное число отключений линии в год при индуцированных перенапряжениях $n_{инд}$, 1/год	0,001	7,3	0,001	1,3
Удельное число грозовых отключений линии $n_{\Sigma} = n_{пум} + n_{инд}$, 1/год	3,6	20,3	0,55	9,2

Линии 3-20 кВ как на металлических, так и на деревянных опорах также не имеют тросовой защиты и защищаются от грозовых воздействий с помощью дугогасящего реактора или изолированной нейтрали и АПВ. На опорах с ослабленной изоляцией или с повышенной вероятностью грозового поражения целесообразно устанавливать вентильные разрядники или ОПН.

Отдельные места линий требуют дополнительных мер защиты. К таким местам относятся:

- пересечения линии электропередачи между собой;
- пересечения линий электропередачи с линиями связи, трамвайными линиями и линиями электрифицированной железной дороги;
- опоры линии электропередачи со сниженной электрической прочностью изоляции;
- высокие опоры переходных пролетов;
- ответвления к подстанциям на отпайках и секционирующие разъединители на линиях;
- кабельные вставки на линиях.

Защита пересечений линий электропередачи вызвана необходимостью предотвратить тяжелые аварии в случае грозового перекрытия с верхней линии на нижнюю линию электропередачи или связи. Такие перекрытия могут вызвать ложную работу релейной защиты и системные аварии, повреждения электрооборудования линий более низкого напряжения и даже повлечь человеческие жертвы. Наибольшую опасность представляет удар молнии в пролет пересечения. Расстояние между проводами пересекающихся

линий в этом пролете должно быть достаточно большим, а амплитуда перенапряжений ограничена разрядниками, расположенными как можно ближе к месту пересечения, поэтому в пролете пересечения целесообразно снять грозозащитный трос с нижней линии и выбрать точку пересечения дальше от середины пролета верхней линии. Если расстояние от места пересечения до ближайшей опоры не превышает 40 м, то разрядники можно устанавливать только на ближайшей опоре. На линиях до 35 кВ, имеющих устройство АПВ, вместо разрядников допускается установка защитных промежутков. Сопротивление заземления опор пролета пересечения не должно быть выше 10...20 Ом. Если опоры деревянные, то на них рекомендуется устанавливать параллельно гирляндам разрядники или искровые промежутки, соединенные спусками с заземлителями опоры.

Необходимое расстояние S по вертикали между проводами пересекающихся линий зависит от номинального напряжения верхней линии, сопротивления заземления опор, длины пролета и расстояния между местом пересечения и ближайшей опорой. Установка защитных средств позволяет уменьшить расстояние S на 20-30%.

Отдельные металлические и железобетонные опоры линий, выполненных, главным образом, на деревянных опорах без тросов, представляют собой место со сниженной импульсной электрической прочностью изоляции. Эти места целесообразно защитить трехфазными комплектами разрядников.

Высокие переходные пролеты ВЛ являются источником повышенного числа грозовых поражений. Это связано с большой высотой опор и проводов над землей, что приводит к увеличению числа ударов молнии в пролет, снижению эффективности защиты тросом, увеличению числа обратных перекрытий из-за большой индуктивности опор. Снижение импульсного сопротивления заземления переходных опор в этом случае становится недостаточным.

Расчет ожидаемого числа отключений ЛЭП с высокими переходными пролетами затруднен необходимостью учета сложного рельефа местности под пролетом и большой разницы высоты провода над землей на отдельных участках пролета, поэтому грозозащита ответственных пролетов рассматривается индивидуально. Как показывают расчеты, наиболее эффективным видом защиты высоких переходов является установка РВ или ОПН в верхней части переходных опор или на опорах, соседних с переходными.

3. Молниезащита подстанций и электрических машин высокого напряжения

3.1. Задачи и критерии грозозащиты подстанций

Надежность защиты электрических станций и подстанций от грозовых перенапряжений должна быть значительно выше надежности грозозащиты линий электропередачи. Это определяется сравнительно большим ущербом от грозовых перенапряжений на подстанциях, чем на линиях. Внутренняя изоляция силовых трансформаторов и другого подстанционного оборудования имеет меньшие запасы электрической прочности по сравнению с изоляцией линии и не обладает свойством самовосстановления после погасания дуги грозового перекрытия.

Защита оборудования подстанций от прямых ударов молнии обеспечивается стержневыми молниеотводами. Кроме того, необходима защита от волн, возникающих на отходящих от подстанции линиях при ударах молнии в провода или опоры этих линий.

Защита от набегающих волн основана на выборе ОПН или разрядников с подходящими защитными характеристиками, выборе их числа и места установки, а также усилении защиты подходов линий для снижения числа набегающих волн с большой крутизной напряжения на фронте.

Как и для линий электропередачи, для сравнения эффективности различных мероприятий по грозозащите подстанций применяется ряд критериев.

Уровень грозоупорности, как и для линий электропередачи, определяется верхними пределами амплитуды тока молнии при прямых ударах в подстанцию, при которых еще не происходит прямого или обратного перекрытия между токоведущими и заземленными частями объекта. Уровень грозоупорности позволяет оценить вероятность повреждения оборудования на подстанции при прямом ударе молнии в молниеотвод или при прорыве молнии на защищаемое оборудование, минуя молниеотводы. Для оценки вероятности повреждения от набегающих на подстанцию волн использовать уровень грозоупорности в качестве критерия оказывается невозможным, поскольку амплитуды перенапряжений в разных точках подстанции существенно зависят не только от амплитуды, но и от крутизны фронта набегающих волн перенапряжений и от других факторов.

Кривая опасных волн представляет собой границу области безопасных сочетаний амплитуды и крутизны (или длины фронта) дошедших до подстанции волн. Вероятность повреждения оборудования подстанции вследствие набегающих волн может быть определена путем интегрирования плотности вероятности всех возможных сочетаний их амплитуды и крутизны по области, расположенной выше кривой опасных волн.

Показатель надежности грозозащиты является более объективным критерием эффективности грозозащиты подстанции. Он определяется как среднее ожидаемое число лет безаварийной работы подстанции при грозовых воздействиях. Показатель надежности грозозащиты может быть рассчитан по формуле

$$\tau = \frac{1}{n_{np} + n_o + n_l + n_{нодох}} \cong \frac{1}{n_l + n_{нодох}},$$

где n_{np} - ожидаемое среднегодовое число превышений допустимого уровня перенапряжений вследствие прорывов молнии на подстанцию, n_o - то же вследствие обратных перекрытий при ударах молнии в молниеотводы и заземляющие конструкции подстанции; n_l - то же вследствие ударов молнии в линии за пределами защищенного подхода; $n_{нодох}$ - то же вследствие ударов молнии в линию в пределах защищенного подхода. Практически при установке молниеотводов в соответствии с Правилами устройства электроустановок и обеспечении их малого сопротивления заземления составляющие n_{np} и n_o оказываются значительно меньшими, чем n_l и $n_{нодох}$ и в дальнейшем могут не учитываться.

3.2. Молниезащита подстанций различных классов напряжения

Линии электропередачи сверхвысокого напряжения (330 кВ и выше) защищаются тросами по всей длине. Для ограничения внутренних перенапряжений на концах линий 330 кВ и выше устанавливают шунтирующие реакторы. При разомкнутом линейном выключателе на них происходит удвоение напряжения набегающих волн. Поэтому для защиты реакторов на линии рядом с ними устанавливают защитные аппараты (ЗА). Габариты открытого распределительного устройства на таких подстанциях не позволяют обеспечить защиту одним ЗА одновременно нескольких силовых трансформаторов, поэтому ЗА устанавливают возле каждого трансформатора или реактора. Часто защитные аппараты устанавливают непосредственно возле выводов трансформатора (до выключателя), поскольку при отключенных обмотках ВН сохраняется опасность возникновения на них атмосферных перенапряжений путем перехода с обмотки СН. Эта опасность особенно велика для автотрансформаторов.

Регулировочные части обмоток трансформаторов и автотрансформаторов, а также обмотки НН защищают соответствующими защитными аппаратами.

В сетях 110-220 кВ реакторы на линиях, как правило, отсутствуют, поэтому отпадает необходимость установки ЗА возле линейного выключателя. Оборудование подстанций этих классов напряжения располагается более компактно, что позволяет ограничиться установкой одного комплекта ЗА на каждую систему шин. Однако на удаленных от шин трансформаторах (например, на ГЭС) необходимо ставить дополнительные ЗА. Кроме того, в этих сетях подходы должны быть защищены защитными аппаратами.

Некоторые особенности имеет грозозащита подстанций 3-20 кВ без электрических машин. Ввод напряжения на такие подстанции обычно осуществляется с помощью кабельных вставок, поскольку большое число воздушных линий 6-20 кВ к подстанции подвести весьма сложно. Схема

грозозащиты такой подстанции приведена на рис. 3.1.

Поскольку такая воздушная линия имеет относительно слабую изоляцию, практически любой удар молнии в линию приводит к трехфазному перекрытию изоляции на землю. В результате по всем трем фазам линии передачи к подстанции распространяются одинаковые волны перенапряжений. В точке соединения воздушной линии с кабелем происходит отражение и преломление волн. Оценить величину преломленной волны можно через коэффициент преломления:

$$\alpha = 2Z_k / (Z_k + Z_l),$$

где Z_k и Z_l - волновые сопротивления кабеля и линии.

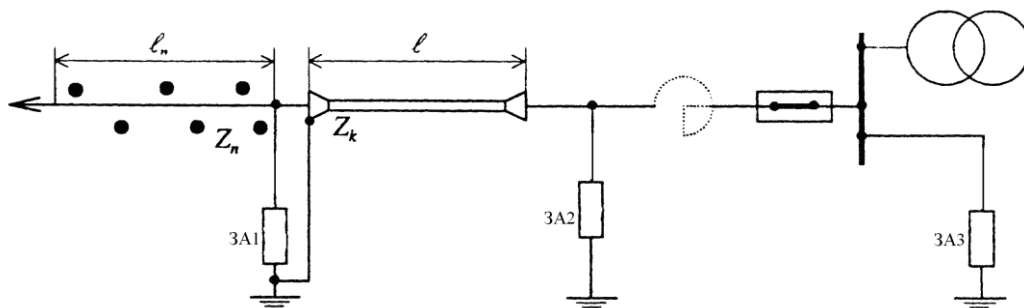


Рис. 3.1 Схема грозозащиты подстанции 6-20 кВ

При движении волны перенапряжений по трем фазам линии передачи напряжение на проводе любой фазы (например, A) U_A связано с токами в фазах I_A , I_B и I_C следующей зависимостью:

$$U_A = I_A Z_{A0} + I_B Z_{AB} + I_C Z_{AC},$$

где Z_{A0} - волновое сопротивление фазы A ; Z_{AB} и Z_{AC} взаимные волновые сопротивления фазы A и фаз B и C .

Поскольку волны движутся по всем трем фазам линии, то ее волновое сопротивление равно

$$Z_l = \frac{Z_A}{3} = \frac{Z_{A0} + 2Z_{AB}}{3}$$

Например, при $Z_{A0} = 400$ Ом и $Z_{AB} = 100$ Ом - $Z_l = 200$ Ом.

Волновое сопротивление кабеля при движении волны (по всем трем жилам) $Z_k = 10 \dots 15$ Ом. При таких значениях Z_l и Z_k коэффициент преломления

$$\alpha = \frac{2 \cdot 10}{10 + 200} \approx 0,1 \ll 1.$$

Таким образом, вычисленное с помощью коэффициента преломления напряжение в кабеле оказывается во много раз меньше.

После многократных отражений и преломлений волн напряжение на подстанции нарастает. При этом через защитные аппараты, установленные на подстанции, после их срабатывания могут протекать чрезмерно большие токи, и ЗА выйдут из строя.

Таким образом, наличие кабельной вставки на входе подстанции не

обеспечивает достаточной грозоупорности подстанции. Поэтому в месте соединения воздушной линии с кабельной устанавливают дополнительный защитный аппарат для ограничения проходящей волны. Установка ЗА оказывается возможной, поскольку срез напряжения в месте соединения не представляет опасности для изоляции (ввиду отсутствия близко расположенных трансформаторов, электрических машин, реакторов).

Оболочка кабеля по кратчайшему пути соединяется с заземлением ЗА. На подстанцию будет попадать напряжение между жилой и оболочкой кабеля. Это напряжение складывается из падения напряжения на ЗА и падения напряжения на индуктивности петли проводника, соединяющего оболочку кабеля с заземлением ЗА, поэтому уменьшение индуктивности соединительного проводника приводит к снижению перенапряжений на оборудовании подстанций.

При малой длине кабеля ($l < l_{кр}$) волна, отраженная от конца кабеля к его началу, снижает напряжение на разряднике, и он может не сработать. В этом случае целесообразно установить ЗА: он имеет более пологую вольт-секундную характеристику и надежнее работает при крутых волнах. Обычно $l_{кр} \approx 100...150$ м.

В конце кабеля при отключенном выключателе напряжение при приходе падающей волны удваивается и возможно повреждение кабельной муфты. Для ограничения таких перенапряжений в конце кабеля устанавливается ЗА.

В схемах мощных подстанций (6-35 кВ) с большим числом отходящих кабелей устанавливают фидерные реакторы для ограничения тока короткого замыкания (рис. 3.1). Для волны с крутым фронтом реактор представляет собой разомкнутый конец, поэтому установка ЗА между реактором и кабелем оказывается обязательной.

Для грозозащиты переключательного пункта (в сетях 6-10 кВ) на всех линиях, откуда возможно питание, размещают защитные аппараты. Например, если питание осуществляется по линии 1 (рис. 3.2), а линии 2 и 3 не

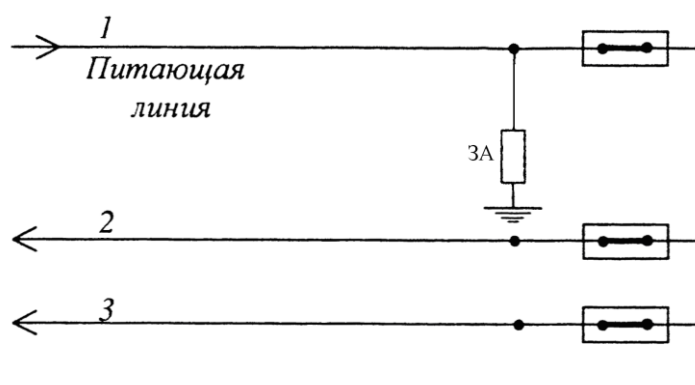


Рис. 3.2. Схема грозозащиты переключательного пункта 6-10 кВ

имеют источников э.д.с., то трубчатый разрядник устанавливают на линии 1

вблизи переключательного пункта.

Иногда сооружение защищенных подходов линий к подстанции оказывается экономически нецелесообразным или неэффективным. В этих случаях используют упрощенные схемы грозозащиты подстанции, в которых отсутствие защищенных подходов линии частично компенсируется установкой дополнительных защитных аппаратов, вынесенных на линию. Такая защита используется, в частности, в тупиковых схемах подстанции 35-220 кВ на отпайках от линий электропередачи и во временных схемах.

Главным условием обеспечения надежной грозозащиты таких схем является максимальное приближение вентильного разрядника к защищаемому оборудованию, что возможно лишь при небольшом количестве ячеек на подстанции и компактном расположении оборудования. За счет близости ЗА в значительной степени подавляется колебательная составляющая импульса грозовых перенапряжений, и его амплитуда становится близкой к остающемуся напряжению ЗА. Однако, в отличие от нормальных схем, уровень остающегося напряжения здесь может превышать допустимую величину перенапряжений вследствие возможности поражения линии вблизи подстанции. Если молния ударила в провода ЛЭП в непосредственной близости от подстанции, перекрытия линейной изоляции может не произойти вследствие защитного действия защитного аппарата. По волновому сопротивлению проводов ЛЭП при этом ответвляется лишь незначительная часть тока молнии и практически весь ток молнии протекает через защитный аппарат.

Ток через ЗА редко превышает 5 кА в сетях 110 и 220 кВ, 8 кА в сети 330 кВ и 10...15 кА в сетях 500 и 750 кВ. В упрощенных схемах ток через них может достигать существенно больших значений. При столь высоких токах остающееся напряжение защитного аппарата оказывается выше допустимого предела, и изоляция подстанции может быть повреждена. Кроме того, такие токи могут повредить и сам ЗА. Все это обуславливает необходимость ограничить в схемах без защищенного подхода ток в подстанционном защитном аппарате. Это достигается подключением к сети дополнительных ЗА, отводящих часть тока волны в землю помимо подстанционного ЗА.

Подключение дополнительных защитных аппаратов на подстанции, рядом с основным, было бы малоэффективным, поскольку даже небольшое различие в вольт-амперных характеристиках, как показано на рис. 3.3, приводит к резко неравномерному распределению токов между ЗА. Кроме того, при близком расположении защитных аппаратов срабатывание одного из них сопровождается снижением напряжения, затрудняющим срабатывание второго ЗА.

Чтобы дополнительные ЗА работали эффективно, их подключают обычно за один-два пролета до подстанции. Это создает подъем напряжения на первом по ходу волны ЗА, что повышает надежность его срабатывания. Обычно в качестве дополнительных защитных аппаратов используются аппараты с худшими характеристиками.

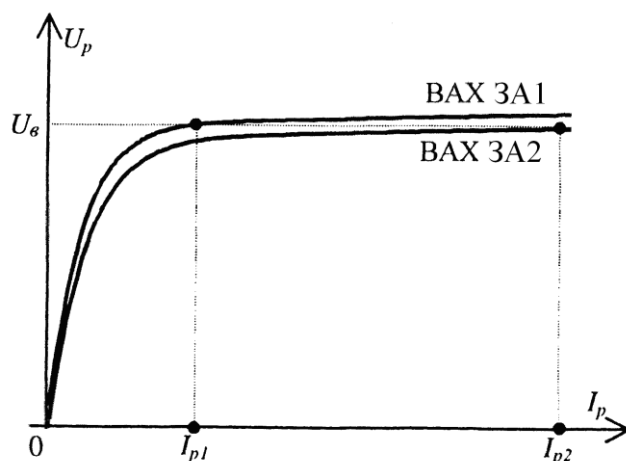


Рис. 3.3. Неравномерное распределение тока в параллельно включенных разрядниках

Пример расположения разрядников в упрощенном варианте грозозащиты подстанции приведен на рис. 3.4. Упрощенные схемы имеют два существенных недостатка, снижающих надежность грозозащиты по сравнению с типовыми схемами. Во-первых, при волнах с пологим фронтом разница в напряжениях в точках установки ЗА может стать недостаточной и первым может сработать подстанционный ЗА. Он защитит от пробоя не только подстанционную изоляцию, но и удаленный от него линейный ЗА, и ограничения тока в подстанционном защитном аппарате не произойдет. Во-вторых, отсутствие защиты подходов делает возможным грозовые поражения пролетов линии между ЗА, что также может повлечь протекание больших токов в подстанционном ЗА.

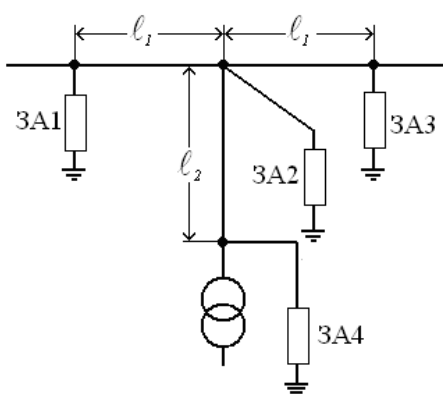


Рис. 3.4. Упрощенная схема грозозащиты подстанции

При выборе расстояния между защитными аппаратами следует учитывать, что чрезмерно большое расстояние увеличивает опасность попадания молнии в пролеты линии между ЗА, а при малых расстояниях возрастает опасность отказа срабатывания линейного защитного аппарата. Расчеты показывают, что оптимальные условия соответствуют удалению защитных аппаратов на расстояние 150÷300 м.

3.3. Молниезащита электрических машин

Молниезащита электрических машин (генераторов, синхронных компенсаторов и высоковольтных электродвигателей) имеет свои особенности:

а) уровень электрической прочности изоляции у машин, бывших длительное время в эксплуатации, значительно ниже, чем у другого электрооборудования;

б) отсутствуют вентильные разрядники или ОПН, которые смогли бы обеспечить достаточно высокую надежность защиты такой изоляции от перенапряжения;

в) грозовые повреждения изоляции электрических машин весьма значительны, так как через место пробоя изоляции машины продолжает протекать аварийный ток за счет э.д.с. остаточного намагничивания даже после снятия возбуждения машины, отключенной от сети;

г) выход из строя электрических машин обуславливает большой экономический ущерб.

С учетом отмеченных особенностей для надежной грозозащиты электрических машин приходится использовать специальные мероприятия. В частности, на подходе линии устанавливают дополнительные разрядники, отводящие часть тока набегающей волны в землю и снижающие таким образом импульсное напряжение на машине. Кроме того, используется защитное действие кабельных вставок на подходах. Чтобы снизить крутизну фронта импульсов перенапряжений на зажимах машины, параллельно с ней подключают конденсаторы. Снижению крутизны фронта способствуют также фидерные реакторы, установленные для ограничения токов короткого замыкания.

Задача грозозащиты намного упрощается, если электрическая машина присоединяется к воздушной сети не непосредственно, а через трансформатор. В этом случае трансформатор существенно ограничивает амплитуду и крутизну импульсов грозовых перенапряжений на зажимах машины.

Схемы грозозащиты электрических машин, непосредственно связанных с воздушной сетью, обычно содержат комплекс следующих защитных средств: ОПН или вентильный разрядник и малоиндуктивный конденсатор на шинах; защищенный подход воздушной линии $l_{\text{п}}$, ОПН или защитные аппараты на подходе линии, токоограничивающий реактор и кабельную вставку (рис. 3.5).

Защитные аппараты ЗАЗ (ЗА1), установленные по ходу движения волн грозовых перенапряжений, предназначены для отвода части тока волны в землю и ограничения тока в ОПН или вентильном разряднике, установленном на электрической машине. Их эффективность зависит от величины сопротивления заземления, достаточная для практики надежность работы схемы обеспечивается при $R_{\text{з}} \leq 10$ Ом. Оптимальная длина

защищенного подхода $l_{\text{п}}$ составляет 100-150 м. Для защиты подхода от прямых ударов молнии используются грозозащитные тросы. Реактор P в схеме рис. 3.5 сглаживает фронт импульса

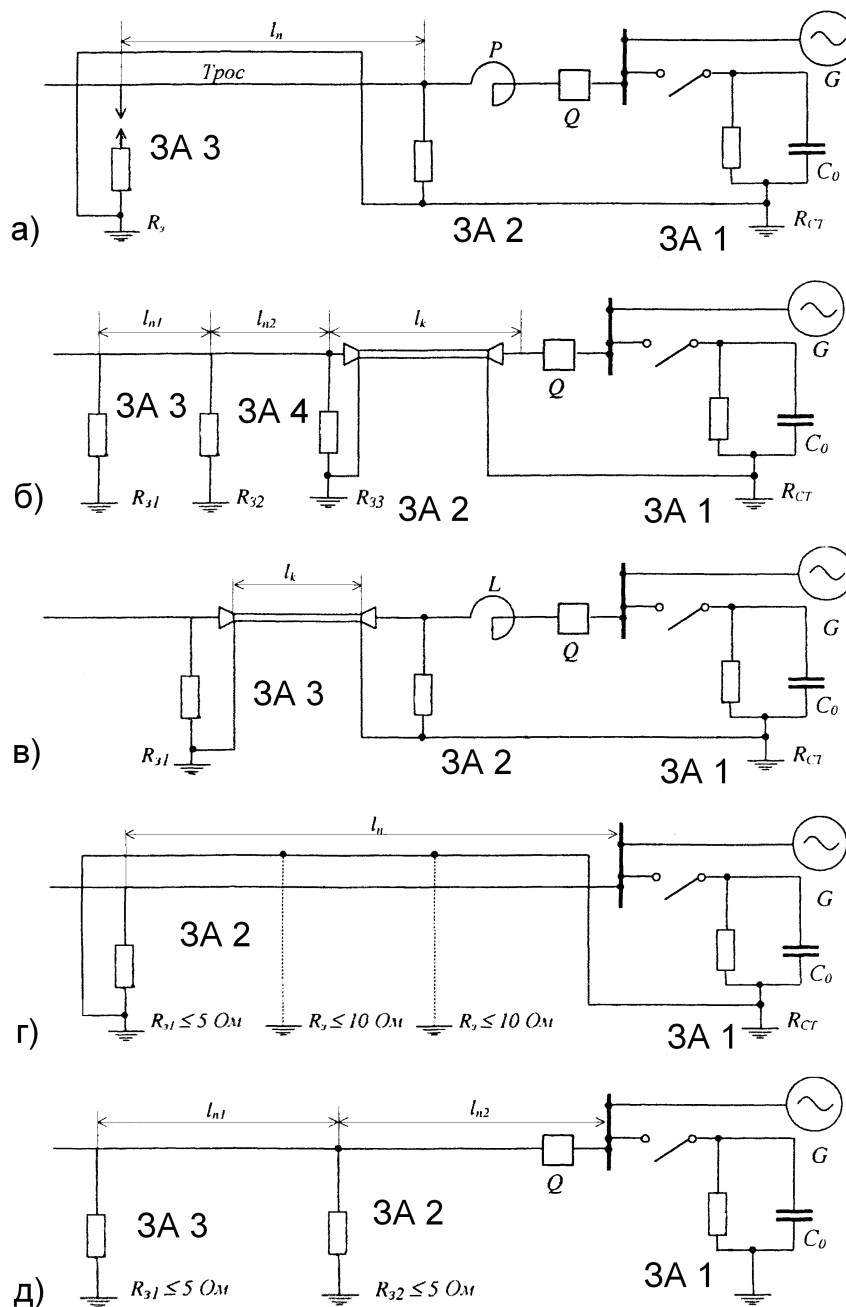


Рис. 3.5 Схемы грозозащиты электрических машин, непосредственно подключенных к воздушной сети

перенапряжений на шинах, а также облегчает условия срабатывания защитного аппарата ЗА1.

Емкость C на шинах предназначена для ликвидации колебательной составляющей напряжения на зажимах машины. Обычно длительность фронта импульса $\tau_{\text{ф}}$ грозовых перенапряжений на зажимах машины за счет малоиндуктивной емкости C увеличивается до 20-50 мкс.

Показатель надежности схемы грозозащиты машины по рис. 3.5,а составляет ~35 лет без учета срабатывания разрядника на противоположном конце линии небольшой длины ($l_{\text{п}} \leq 1...2$ км). Срабатывание защитных аппаратов, установленных на противоположном конце линии, значительно улучшает показатель надежности: в этом случае он составляет ~70 лет.

В схеме рис. 3.5,б новым элементом является кабельная вставка, отделяющая воздушную линию от шин с электрической машиной. Ее защитная роль не ограничивается добавлением дополнительной емкости, сглаживающей волну. Кабельная вставка служит для отвода значительной доли тока волны в землю помимо шинного защитного аппарата. Это достигается следующим образом. При срабатывании ЗА4 на входе кабельной вставки жила кабеля оказывается соединенной параллельно с его оболочкой (через динамическое сопротивление R_{B1}). Вследствие большой скорости изменения напряжения волны ее движение по кабелю сопровождается появлением поверхностного эффекта. Ток волны вытесняется из жилы на оболочку кабеля, имеющую контакт с землей, и уходит в землю, минуя шины подстанции.

Достаточная для практики надежность требует, чтобы длина кабельной вставки $l_{\text{к}}$ составляла не менее 300 м, а защищенного воздушного подхода не менее $l_{n1} \approx l_{n2}$ - не менее 100 м. При этом сопротивление заземления R_{31} , R_{32} и R_{33} не должно превышать $5 \div 10$ Ом. Согласно исследованиям, показатель надежности грозозащиты по схеме рис. 3.5, б составляет не менее 20 лет.

На практике зачастую применяется схема рис. 3.5,в, содержащая одновременно токоограничивающий реактор и кабельную вставку. При этом обеспечивается наивысшая надежность грозозащиты электрических машин, гальванически связанных с воздушной сетью (порядка 100 лет), если длина кабеля $l_{\text{к}}$ не менее 50 м, а сопротивление заземления ЗАЗ - не более 5 Ом.

Из всех схем грозозащиты электрических машин наименьшей надежностью обладают схемы рис. 3.5,з,д когда машина непосредственно подключена к воздушной сети. Она содержит несколько комплектов защитных аппаратов, установленных на подходе длиной $l_{\text{к}} = 300...600$ м.

4. Воздействия перенапряжений на изоляцию электроустановок

Необходимо учитывать, что перенапряжения, возникающие в реальных электрических сетях, обладают широким спектром амплитуд, частот и длительности. Для правильного понимания реакции изоляции на приложенное напряжение следует, прежде всего, рассмотреть и описать результаты воздействия заданного импульсного напряжения с заданными параметрами. Свойства изоляции при воздействии импульсного напряжения с различной амплитудой и различной длительностью описываются обычно с помощью вольт-секундных характеристик.

Воздействие перенапряжений может быть более сложным в физическом плане. Так единичное перенапряжение может не привести к пробое, который наступает после нескольких перенапряжений. В ряде случаев перенапряжение является спусковым механизмом и катализатором других процессов, которые воздействуют на развитие дефектов и старение изоляции.

4.1. Воздействие импульсных перенапряжений на газовую изоляцию электрических аппаратов.

В общем случае вольт-секундные характеристики представляют собой зависимость напряжения пробоя изоляционного промежутка от длительности приложенного напряжения. Эта зависимость возникает потому, что развитие электрического пробоя в изоляционном промежутке, как и всякий другой физический процесс, имеет ограниченную скорость и требует определённого времени. Пробой не может возникнуть, если импульс приложенного напряжения заканчивается раньше, чем в промежутке возникнет проводящий канал ионизованного газа. Скорость развития разряда существенно зависит от различных внешних условий, в первую очередь от состава изолирующей среды, от приложенной разности потенциалов и от распределения электрического поля в промежутке. На практике эти показатели взаимосвязаны. Например, использование атмосферного воздуха в качестве изолирующей среды в линиях электропередачи и ОРУ всегда связано с сильно неоднородным распределением электрического поля, когда максимальная напряжённость на высоковольтном электроде в 30-50 раз больше средней величины внутри изолирующего промежутка, а длина изолирующего промежутка может быть больше 10 м. С другой стороны, применение элегаза на практике всегда связано с формированием электрического поля со слабой неоднородностью, когда максимальная напряжённость превосходит среднюю не более, чем в 4-5 раз. Кроме того, элегаз обладает большей электрической прочностью и используется, как правило, при повышенном давлении, что позволяет сократить размеры изолирующих промежутков до десятков миллиметров. Эти различия приводят к существенной разнице в скорости и длительности развития пробоя.

Физические явления, возникающие в изолирующем промежутке при пробое, то есть механизм разряда, также могут изменяться при изменении

длины промежутка. В воздухе при атмосферном давлении при длинах промежутков от 2-3 см до 2-3 м разряд развивается в соответствии с «примерным механизмом со скоростью, по порядку величины приближающейся к скорости света. При увеличении длины промежутков свыше 2-3 м разряд переходит в лидерную форму и скорость его развития многократно уменьшается.

Ввиду большого практического значения свойств изолирующих промежутков, для изучения импульсной электрической прочности газовой изоляции были выполнены многочисленные исследования, позволившие, в частности, определить вольт-секундные характеристики важнейших промежутков. Обычно вольт-секундная характеристика строится следующим образом.

На объект подаются импульсы напряжения одинаковой формы, но с разной амплитудой. Для обработки результатов используются эксперименты, приводящие к пробое. При пробоях на фронте импульса фиксируются точки начала среза напряжения, а при пробоях на спаде импульса фиксируется максимальное значение напряжения. Таким образом, получается вольт-секундная характеристика, дающая представление о пробое при воздействии импульсов одной и той же формы.

Как показано на рис.4.1, полное время от начала импульса напряжения до завершения пробоя складывается из трёх составляющих:

t_0 - время от начала импульса до момента, когда напряжение превышает критическое начальное значение U_0 ;

t_s - время от момента формирования сильного, достаточного для ионизации молекул газа, электрического поля до момента возникновения эффективного начального электрона. Время t_s называют временем статистического запаздывания;

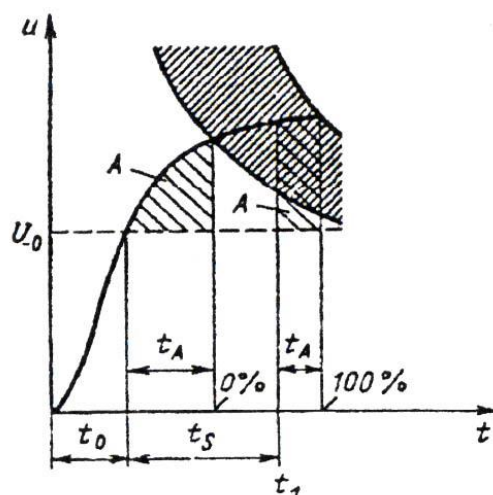


Рис. 4.1. Использование объемно-временного закона и критерия Кинда для построения вольтсекундной характеристики

t_A - время формирования разряда, зависящее от его вида. При стримерном разряде время t_A складывается из времени формирования стримерного канала и

времени формирования искрового канала, которым часто можно пренебречь. При лидерном канале добавляется ещё время формирования лидера с относительно большим разбросом.

На рис.4.2 показаны типичные вольт-секундные характеристики, полученные для промежутка в элегазе при грозовых импульсах. Поскольку время запаздывания t_s и время формирования разряда t_A обладают статистическим разбросом, то вольт-секундные характеристики представляют собой области, как это видно на рис. 4.2. Нижняя граница области является вольт-секундной характеристикой 0%-ного разрядного напряжения ($U_{0\%}$), а верхняя - 100%-ного ($U_{100\%}$). Так как для получения этих граничных характеристик требуется очень большое число опытов, то, исходя из практических потребностей, часто ограничиваются 95%-ным ($U_{95\%}$) и 5%-ным ($U_{5\%}$) разрядными напряжениями. Нижняя граница разрядных напряжений имеет особенно большое значение при конструировании изоляции, так как именно она позволяет предотвратить пробой с заданной вероятностью (или, что тоже, допустить возникновение пробоя с заданной малой вероятностью).

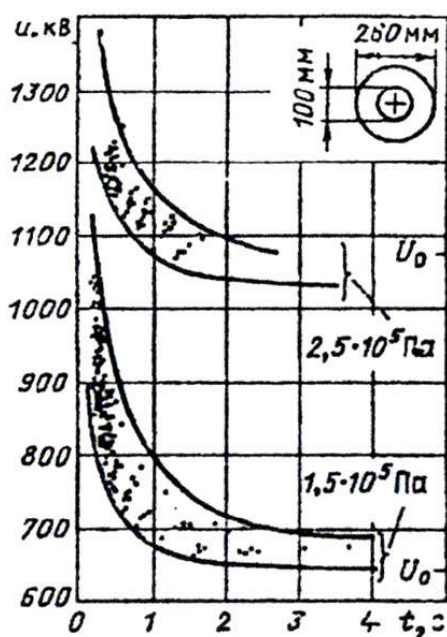


Рис. 4.2. Рассчитанные и измеренные вольт-секундные характеристики промежутка с элегазом при грозовых импульсах

Видно, что с уменьшением длительности импульсного воздействия напряжение, необходимое для пробоя изолирующего промежутка возрастает. Это общая, генеральная взаимосвязь между напряжением пробоя и длительностью воздействия, свойственная всем видам изоляции. На неё, однако, накладываются специфические свойства различных изоляционных систем, благодаря чему меняется уровень напряжения пробоя и степень его зависимости от длительности воздействия. Например, для длинных (более 3-5 м) воздушных промежутков характерно существование минимума электрической прочности при коммутационных перенапряжениях с длиной фронта 50-300 мкс,

что связано с условиями накопления объёмного заряда в промежутке на стадиях, непосредственно предшествующих пробое.

Во многих случаях распределение разрядных напряжений определяется нормальным (гауссовским) законом. В связи с этим верхняя и нижняя границы разрядных напряжений часто характеризуются трёхкратным значением среднеквадратичного отклонения напряжения от среднего значения.

Разрядные напряжения зависят от формы импульса приложенного напряжения, поэтому приведенные на рис.4.2 вольт-секундные характеристики верны только при одной форме импульсов: при различных формах импульсов получаются различные вольт-секундные характеристики.

На рис. 4.3 показано схематическое изображение вольт-секундных характеристик изолирующих промежутков в элегазе, воздухе и в бумажно-масляной изоляции. Вольт-секундная характеристика длинного воздушного промежутка в условиях возникновения лидерной формы разряда имеет характерный минимум в области коммутационных перенапряжений. В элегазе в слабонеоднородном электрическом поле условия развития стримеров более благоприятны, чем в воздухе в условиях сильно неоднородного поля. Поэтому вольт-секундные характеристики элегазовых устройств при времени воздействия $t < 10^4$ с проходят левее, чем характеристики воздушных промежутков. Это означает, что простейшие воздушные промежутки нельзя использовать в качестве защитных для элегазовых устройств. При достаточно крутом импульсе перенапряжения разряд в элегазе произойдёт раньше, чем в воздухе. Правильное сочетание

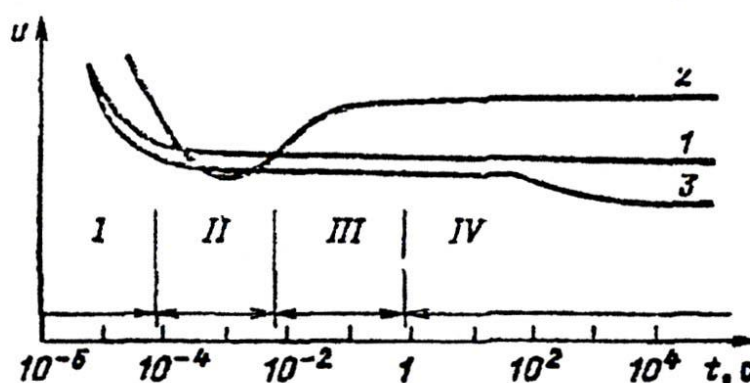


Рис.4.3. Схематическое представление вольт-секундных характеристик в элегазе (1) и воздухе при малых расстояниях между электродами (стримерный разряд), в воздухе при больших расстояниях (лидерный разряд) (2) и в бумажно-масляной изоляции с учетом старения (3); I - грозовые перенапряжения; II - коммутационные перенапряжения; III - длительные перенапряжения; IV - рабочие напряжения

напряжения срабатывания защитных разрядников и уровней изоляции каждого устройства с учётом пространственно-временного развития

перенапряжений представляет собой задачу координации изоляции аппаратов и сети.

Вольт-секундная характеристика бумажно-масляной изоляции показана с учётом её старения при длительном приложении напряжения.

В том случае, если к изоляции многократно (n раз) прикладываются одинаковые импульсы высокого напряжения и в некоторых из этих опытов происходит пробой, можно оценить вероятность пробоя как отношение числа пробоев m к полному числу выполненных опытов: $p \approx m/n$. Зависимость этой вероятности от амплитуды импульсного напряжения U_m называется функцией эффекта. Функция эффекта используется, как правило, для описания самовосстанавливающейся изоляции, поскольку именно в этом случае зависимость $P(U_m)$ можно относительно просто получить в результате эксперимента. Характерный вид функции эффекта показан на рис.4.4.

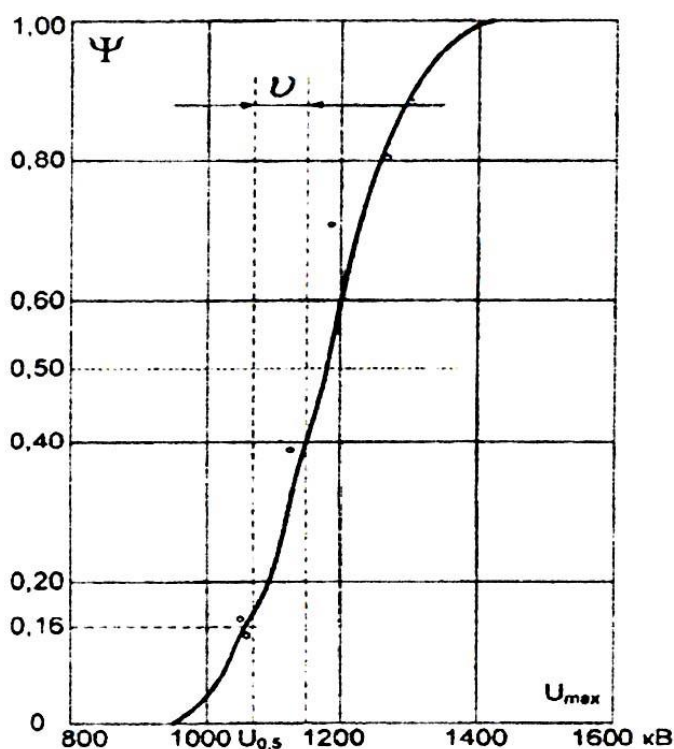


Рис. 4.4. Зависимость вероятности перекрытия воздушного промежутка длиной 3 м от амплитуды импульса коммутационного перенапряжения с длительностью фронта $\tau_{ф} = 2800$ мксек

В силу физических свойств газовой изоляции вероятность пробоя всегда равна нулю при амплитуде приложенного напряжения, меньшей некоторого минимального значения U_{min} и равна единице при амплитуде, превышающей некоторое максимальное значение U_{max} . Уровни U_{min} и U_{max} могут быть определены из эксперимента лишь с некоторой погрешностью, зависящей от количества выполненных опытов. Следует отметить, что информация о величине U_{min} имеет крайне важное значение при переходе от единичного

изоляционного промежутка к сложной системе, состоящей из большого числа промежутков, поскольку при этом любые изменения функции эффекта ограничены слева значением U_{min} и при любом числе промежутков пробой при уровне напряжения, меньшем U_{min} принципиально невозможен. Очевидно, что величина U_{min} не может быть меньше напряжения начала коронного разряда.

На функции эффекта обычно выделяют то значение амплитуды приложенного напряжения U_m , которое соответствует вероятности пробоя, равной 0.5. Его называют 50%-ным напряжением пробоя и обозначают обычно $U_{0.5}$ или $U_{50\%}$. Как показывают многочисленные эксперименты, для внешней изоляции (в том числе при пробое вдоль поверхности загрязнённых изоляторов в сухом и в увлажнённом состоянии) функция эффекта изолирующих промежутков в воздухе при атмосферном давлении может быть аппроксимирована функцией нормального распределения случайных величин

$$P(U_m) = \frac{1}{\nu\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{U_m} \exp\left[-\frac{(U - U_{50\%})^2}{2\nu^2}\right] dU, \quad (4.1)$$

где ν - это коэффициент, характеризующий крутизну функции эффекта, далее называемый стандартом кривой эффекта. При аппроксимации функции эффекта функцией нормального распределения случайных величин по формуле (10.1) 50%-ное напряжение пробоя $U_{50\%}$, заменяет математическое ожидание случайной величины, а стандарт кривой эффекта ν заменяет среднеквадратическое отклонение случайной величины. Поэтому, в соответствии с свойствами функции распределения случайных величин, стандарт кривой эффекта может быть численно определён как разность напряжений, соответствующих вероятности пробоя 50% и 16%:

$$\nu = U_{50\%} - U_{16\%}.$$

Для определения параметров функции эффекта по результатам эксперимента существует несколько способов, в том числе с использованием вероятностной бумаги нормального распределения, по методу “вверх-вниз” и др.

При использовании аппроксимации (4.1) необходимо учитывать, что функция нормального распределения определена на всей числовой оси, то есть не имеет ограничений, аналогичных U_{min} и U_{max} для функции эффекта. Это означает, что на границах диапазона роста функции эффекта аппроксимация (4.1) обязательно становится неправомерной. Это ограничение носит принципиальный характер, поскольку при низких напряжениях связано с невозможностью пробоя при отсутствии каких-либо ионизационных явлений, при высоких напряжениях - с наблюдаемым разрушением любого изолирующего устройства в достаточно сильном электрическом поле.

Многочисленные проверки соответствия функции эффекта и нормального распределения случайной величины показали, что в пределах от $U_{50\%} - 3\nu$ до $U_{50\%} + 3\nu$ соответствие удовлетворительное, однако использование формулы (4.1) за пределами указанного диапазона может привести к бессмысленным, противоречащим физической сути наблюдаемых явлений, результатам.

В качестве примера построения функции эффекта по результатам экспериментов можно привести рис.10.4, на котором показана зависимость вероятности перекрытия воздушного промежутка длиной 3 м от амплитуды импульса коммутационного перенапряжения с длительностью фронта 2800 мкс. Эксперимент, в ходе которого было выполнено пять серий по 25 опытов в каждой, позволил получить пять оценок вероятности пробоя, указанных на рис. 4.4. Аппроксимирующая кривая, соответствующая формуле (4.1), проведена по экспериментальным точкам по методу наименьших квадратов.

Как и в случае с вольт-секундными характеристиками, функция эффекта зависит от формы и длительности используемых импульсов напряжения. Степень этой зависимости позволяет установить рис.4.5. На рис.4.5 приведены зависимости усредненных значений напряжения пробоя, то есть при импульсных воздействиях именно 50%-ные напряжения пробоя $U_{50\%}$. Например, как показано на рис. 4.5, при изменении длины фронта импульса от 1 мкс до 50 мкс 50%-ное напряжение пробоя в воздушном промежутке «стержень-плоскость» длиной 3 м уменьшается от 1,6 МВ до 0,95 МВ, то есть на 40 %. Это означает, что график функции эффекта будет смещён на такую же величину влево. При изменении формы импульса меняются и другие характеристики функции эффекта. Например, параметр ν в промежутке «стержень-плоскость» в воздухе для импульсов грозовых перенапряжений меняется в диапазоне, (0,01-0,02) $U_{50\%}$, в то время как для импульсов коммутационных перенапряжений увеличивается до (0,06-0,08) $U_{50\%}$.

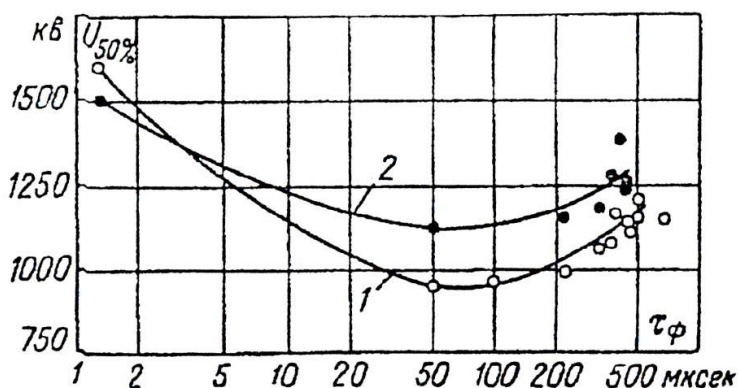


Рис.4.5. Зависимости 50%-ных разрядных напряжений воздушных промежутков от длины фронта импульса; 1 - стержень - плоскость, $S=3$ м; 2 – стержень-стержень, $S=2,5$ м

На линиях электропередачи, а также на подстанциях всегда существует большое число однотипных изолирующих промежутков, пробой каждого из которых равносильен пробоем линии или подстанции в целом. Вероятность пробоя двух и более изолирующих промежутков в этом случае может быть значительно больше, чем вероятность пробоя единичного промежутка. Это

обстоятельство необходимо учитывать при обеспечении надёжной работы линий и подстанций.

Если допустить, что все однотипные промежутки (например, промежутки вдоль поверхности опорных изоляторов) имеют совершенно одинаковые характеристики электрической прочности, то на основании формул теории вероятностей можно получить простые известные соотношения между характеристиками электрической прочности отдельного промежутка и сложной системой промежутков в целом.

Пусть вероятность пробоя единичного промежутка при воздействии импульса перенапряжения с амплитудой U_m равна $P_1(U_m)$. В этом случае отсутствие пробоя этого промежутка произойдёт с вероятностью $1 - P_1(U_m)$. Поскольку события, заключающиеся в отсутствии пробоев каждого из включенных параллельно изолирующих промежутков, совершенно независимы (в силу того, что промежутки при отсутствии пробоя никак не влияют друг на друга), вероятность отсутствия пробоя всей системы будет равна произведению вероятностей отсутствия пробоев каждого из всех промежутков

$$1 - P_n(U_m) = [1 - P_1(U_m)]^n, \quad (4.2)$$

где n - число параллельно включенных промежутков,

$P_n(U_m)$ - вероятность пробоя системы в целом.

Следовательно, $P_n(U_m) = 1 - [1 - P_1(U_m)]^n$,

Раскладывая полученное выражение по формуле бинома Ньютона после преобразований получаем

$$P_n(U_m) = nP_1(U_m) \left[1 - \frac{n-1}{2} P_1(U_m) + \frac{(n-1)(n-2)}{6} P_1^2(U_m) - \dots \right] \approx P_1(U_m).$$

Последнее приближённое равенство справедливо при малых вероятностях $P_1(U_m) \ll 1/n$. Например, погрешность не превысит 10%, если $P_1(U_m) \leq 0,2/(n-1) \approx 0,2/n$.

На рис.10.6 приведены результаты вычислений по формуле (10.2) в виде зависимостей $P_n(U_m)$ при различных n . В соответствии со сказанным выше эти зависимости являются функциями эффекта для систем, объединяющих различное число параллельных промежутков. Как видно, с ростом числа промежутков n графики этих функций смещаются влево и делаются одновременно более крутыми. Это приводит к уменьшению параметра $U_{50\%}$ и уменьшению стандарта кривой эффекта σ . При неизменном n увеличение числа промежутков приводит к многократному росту вероятности пробоя.

Из сказанного следует, что оценить изменение характеристик электрической прочности при воздействии перенапряжений, связанное с ростом числа параллельных промежутков можно только в том случае, если известны параметры кривой эффекта единичного промежутка $U_{50\%,1}$ и σ_1 . При отсутствии сведений о σ_1 , рекомендациями МЭК предложено использовать завышенное значение $\sigma_1 = 0,06 U_{50\%,1}$.

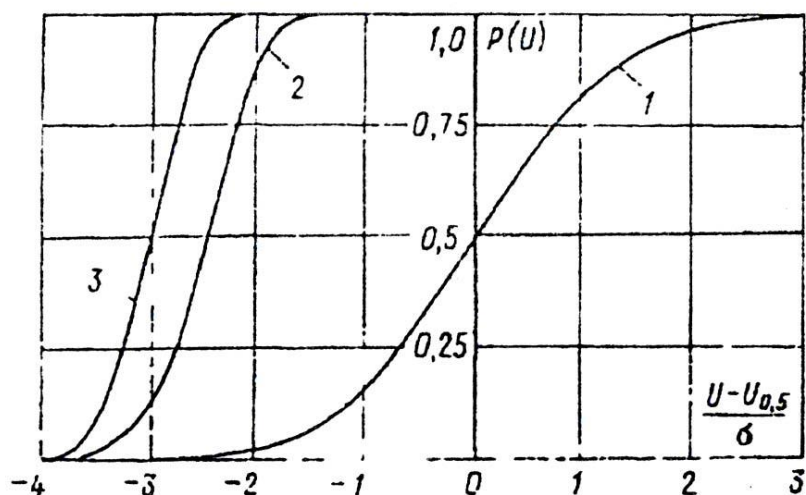


Рис. 4.6. Зависимости вероятности перекрытия совокупности n изоляционных конструкций подстанции P_n от величины воздействующего напряжения при $n = 1$ (кривая 1); $n = 100$ (кривая 2) и $n = 500$ (кривая 3)

Применение формулы (10.2) и данных табл. 4.1 требует ряда оговорок. Во-первых, как отмечалось выше, функция эффекта реального промежутка обязательно ограничена в области малых напряжений некоторым значением U_{min} при котором вероятность пробоя делается равной нулю. Формула (4.2) никак не учитывает этого обстоятельства, в результате чего при очень больших n позволяет вычислить некоторые, не имеющие физического смысла, вероятности пробоя при любых, сколь угодно малых напряжениях. Во-вторых, кривая эффекта единичного промежутка на рис.4.3 проведена по заданным значениям $U_{50\%1}$ и v_1 , в предположении, что она хорошо аппроксимируется формулой (4.1) функции нормального распределения некоторой случайной величины. Выше было отмечено, что это предположение экспериментально подтверждено в диапазоне амплитуд от $U_{50\%1} - 3v_1$ до $U_{50\%1} + 3v_1$ и никак не может быть правильным при малых напряжениях. Таким образом, в области напряжений $(U_m - U_{50\%1})/v_1 < -3$ за пределами указанного диапазона данные рис 4.3 и табл.4.1 могут быть неточными. В третьих, надо помнить, что даже при правильной аппроксимации кривой эффекта единичного промежутка формулой 4.3, преобразование по формуле (4.2) нарушает «нормальность» вида кривых рис. 4.6 при $n > 1$ и делает для них невозможным применение соответствующего математического аппарата.

4.2. Воздействие перенапряжений на комбинированную изоляцию

Изоляционные конструкции многих электроустановок являются комбинированными как в смысле возможностей восстановления после пробоя, так и в смысле применяемых материалов. Картина разряда при этом зависит от

ряда факторов: конструкции и разрядов элементов изоляционной конструкции величины поверхностной проводимости, выполнение узла сочленения токоведущей части электроустановки и диэлектрика, загрязнение поверхности диэлектрика, увлажнение диэлектрика и др.

Таблица 4.1

n	$Z_{0.5}(n) = \frac{U_{0.5;1} - U_{0.5;n}}{v_1}$	$\beta = \frac{v_n}{v_1}$
2	0.55	0.81
4	1.0	0.70
10	1.5	0.60
30	2.0	0.48
100	2.45	0.40
500	3.0	0.36
1000	3.2	0.33
10000	3.8	0.27

Типичным примером, такой изоляции является сочетание твердого диэлектрика и газовой изоляции.

Наличие твердого диэлектрика, диэлектрическая проницаемость которого много больше диэлектрической проницаемости газов при нерациональной конструкции может привести к существенному изменению картины электрического поля между электродами, усилению напряженности в газе вблизи поверхности твердого диэлектрика и в его толще. Следствием этого является резкое снижение электрической прочности конструкции в целом. Так, в резко неоднородном поле, например (когда толщина твердого диэлектрика значительно меньше, чем расстояние между электродами), при кратковременных воздействиях быстронарастающего напряжения перекрытие вдоль поверхности твердого диэлектрика может развиваться при очень малых средних значениях разрядной напряженности (определенной как отношение напряжения перекрытия к расстоянию между электродами) по сравнению с чисто газовыми промежутками с резконеоднородным полем. Большая напряженность электрического поля вблизи электродов приводит к тому, что при сравнительно малых напряжениях начинается коронный разряд вблизи электродов. При дальнейшем повышении напряжения начинается развитие стримеров, как и в чисто газовых промежутках. Канал стримера отделен от поверхности твердого диэлектрика слоем газа, поскольку вливающиеся в стример лавины электронов образуются вследствие фотоионизации молекул газа и развиваются в нем. Однако из-за крайне неравномерного распределения напряженности поля в рассматриваемом случае разогрев канала стримера, при котором начинается термическая ионизация, происходит при очень малой длине стримера. Так, в воздухе при относительной плотности $\delta = 1$ и толщине твердого диэлектрика в несколько миллиметров уже при длине стримеров 5-10 см происходит образование лидерного канала. Характерно,

что такие явления развиваются при быстроменяющемся напряжении (переменное напряжение, импульсы с большой крутизной). При медленном нарастании напряжения на поверхности твердого диэлектрика оседает объемный заряд, образовавшийся в результате развития стримера. Этот заряд на поверхности твердого диэлектрика ослабляет поле вблизи электродов, что приводит к затуханию разряда.

При возникновении хорошо ионизованных каналов разряда вдоль поверхности твердого диэлектрика резко снижается напряжение перекрытия, причем характерно, что зависимость напряжения перекрытия от расстояния между электродами S резко нелинейна. Напряжение перекрытия может быть оценено по эмпирическим формулам вида

$$U_p = k \left(\frac{d}{\varepsilon} \right)^{0,4} S^{0,2},$$

где d - толщина твердого диэлектрика; ε - его диэлектрическая проницаемость; S - расстояние между электродами; k - коэффициент, зависящий от скорости нарастания напряжения, картины поля.

Увеличение поверхностной проводимости твердого диэлектрика приводит к выравниванию распределения напряженности поля по поверхности диэлектрика. Соответственно снижается напряженность поля вблизи электрода и повышается начальное напряжение короны и появления стримеров, т.е. начальное напряжение скользкого разряда.

На электрическую прочность существенное влияние оказывает выполнение узла сочленения изолятора с электродами и, в частности, плотность прилегания твердого диэлектрика к электроду. При неплотном прилегании в газовой прослойке, твердый диэлектрик - электрод, возникает значительное местное превышение напряженности электрического поля, ионизационные процессы (самостоятельный разряд, приводящий к пробое газовой прослойки) начинаются при сравнительно низком напряжении на электроде и при их достаточной интенсивности приводят к старению твердой изоляции и, как следствие, к снижению длительной электрической прочности.

Увлажнение загрязненных поверхностей изоляторов значительно снижает их электрическую прочность. При этом возможны перекрытия не только при перенапряжениях, но и при рабочем напряжении.

Слой загрязнения на поверхности изоляторов образуется в результате выпадения из потоков воздуха твердых или жидких взвешенных частиц. Интенсивность этого процесса пропорциональна градиенту скорости воздушного потока у поверхности изолятора.

Перекрытия загрязненной изоляции происходят, как правило, при увлажнении морозящим дождем, туманом, росой, когда загрязненный слой насыщается влагой и на поверхности изоляторов образуется электролит. По поверхности изолятора начинает протекать ток, называемый током утечки.

Электролит разогревается, влага испаряется. На отдельных участках поверхности, где плотность тока наибольшая или наименьшая толщина

увлажненного слоя, образуются подсушенные зоны. Эти зоны быстро расширяются в направлении, перпендикулярном линиям тока, до тех пор, пока вследствие увеличения падения напряжения не происходит перекрытие подсохшей зоны шириной всего в несколько миллиметров по воздуху. Образуется электрическая дуга, опорные точки которой располагаются по краям подсохшей зоны.

Разогреваемая опорными точками дуги увлажненная поверхность быстро подсушивается. Поэтому дуга непрерывно перемещается. В результате подсохшая кольцевая зона расширяется, что приводит к удлинению дуги. Это приводит к дальнейшему уменьшению тока и к дальнейшему увеличению сопротивления дуги, что также вызывает уменьшение тока. В результате тепловыделение на поверхности изолятора снижается. Поверхность снова увлажняется. По ней восстанавливается ток. Дуга гаснет. Такой режим перемежающихся дужек является нормальным для работы изоляции в электрических полях. Однако в этих условиях возникает периодическое ослабление изоляции, которая легко перекрывается при перенапряжениях.

4.3. Воздействие электрического поля на полимерную изоляцию

В современных условиях все более широко применяются изоляционные конструкции на полимерной изоляции, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционной изоляцией по массогабаритным, электрическим и физико-механическим свойствам, технологии изготовления, прокладке, монтажу и др. Однако в процессе эксплуатации конструкции с полимерной изоляцией часто выходят из строя значительно раньше гарантийного срока службы. Это требует дополнительных исследований учитывающих все факторы влияния на полимерную изоляцию, в том числе и перенапряжений.

В качестве полимерных композиций были испытаны как широко применяющиеся в кабельной изоляции марки: 102-01 К, 107-01 К, 153-01 К, 178-01 К, так и новые специально созданные серии композиций для испытаний на стойкость к водным триингам (дефектам).

Сорбция влаги органическими материалами - активированная диффузия. Молекулы высокомолекулярных материалов - полимеров и их части совершают тепловые колебания около центров равновесия в широком диапазоне частот до 10^{12} Гц. Благодаря этим колебаниям цепей и сегментов макромолекул, возникают «дырки», в которые попадают молекулы воды. По теории академика Я. И. Френкеля молекулы воды, захваченные «дырками», колеблются до тех пор, пока не образуются новые «дырки», куда они и передвигаются. Переход молекул воды из одного закрепленного состояния в другое требует затрат энергии - энергии активации.

Сорбционная влага в полимерах оказывает существенное влияние на их электрические свойства, так как она сама обладает высокой диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 81$ и электропроводностью.

В однородном электрическом поле (постоянном или переменном) сумма приложенных к каждому диполю - молекуле воды сил поля равна нулю.

Поэтому однородное поле и его силы не оказывают прямого влияния на движение молекул воды в электрической изоляции, то есть сорбция влаги будет идти за счет активированной диффузии в органических полимерах благодаря перепаду давлений на сухой и влажной стороне образца.

В подавляющем большинстве реальных конструкций, хотя и применяются специальные конструктивные решения и меры, изоляция работает в условиях неоднородного электрического поля.

В неоднородном поле сумма сил, приложенных к каждому диполю, не равна нулю. Поэтому силы поля f направлены в сторону возрастания абсолютной величины вектора напряженности поля E независимо от направления вектора (при постоянном или переменном напряжении), то есть при изменении направления электрического поля диполь все равно будет увлекаться в сторону возрастания электрического поля. Причина заключается в том, что при изменении направления вектора E изменяется также и направление поляризации диэлектрика. Следовательно, в электрическом неоднородном поле диполь увлекается в область наибольшей величины напряженности электрического поля.

По мере проникновения молекулы воды в область большей напряженности силы поля будут возрастать. Если на пути проникновения воды будут встречаться поры, заполненные воздухом или газом (технологические дефекты в электрической изоляции, возникшие в момент экструзии), то молекулы воды будут втягиваться в эти поры и заполнять их, так как локальная напряженность электрического поля в них будет значительно больше, чем в окружающем пору полимере. Молекулы воды могут достигать поверхности жилы кабеля и накапливаться там, в полостях или технологических дефектах электрической изоляции.

При переменном напряжении удельные давления будут иметь динамический характер, причем их амплитуда будет увеличиваться по мере втягивания молекул воды в область большей неоднородности поля. Этот процесс будет более эффективным по увлажнению электрической изоляции по сравнению с постоянным напряжением при одинаковых напряженностях электрического поля.

Экспериментальные исследования подтвердили вывод о существенном влиянии электрического поля на процесс увлажнения изоляции и позволили получить количественную оценку. Эксперименты проводили на отрезках одножильных кабелей с монолитной изоляцией в дистиллированной воде. Все образцы кабелей находились в одинаковых условиях, но на одни образцы подавали напряжение 50 Гц 5 кВ (напряженность на поверхности жилы $E=4,85$ кВ/мм), 7,5 кВ ($E=7,25$ кВ/мм) и 10 кВ ($E=9,68$ кВ/мм) соответственно, а другие образцы - контрольные, находились без напряжения. Образцы, которые находились под напряжением, выходили на равновесное увлажнение через 60-90 минут. Выход на равновесное увлажнение контрольных кабелей, находящихся в воде без напряжения, происходил за время более 20 суток при общей продолжительности испытаний этих отрезков кабелей 30 суток.

При перенапряжениях неоднородность поля резко возрастает, возникают условия для старта частичных разрядов, которые продолжаются уже на частоте 50 Гц, прокладывая путь молекулам воды. При некоторых видах перенапряжений возникают высокочастотные переходные процессы в килогерцовом диапазоне, что усиливает скорость продвижения молекул воды многократно. Экспериментальные исследования влияния электрического поля при перенапряжениях на процесс увлажнения весовым методом (прямой способ - взвешивание образцов с сорбированной влагой) показали, что увлажнение полимеров может ускориться на два и более порядков.

Зарождение и развитие водяного триинга (ВТ) происходит после локального накопления влаги в толще полимерной изоляции. Экспериментально установлено, что ограниченное количество локально накопленной влаги может привести к тому, что после зарождения и развития ВТ влаги не хватает для дальнейшего продолжения роста ВТ, тогда он переходит в электрический триинг (ЭТ), который продолжает развиваться в полимерной изоляции и завершается ее пробоем.

Таким образом, скорость роста триинга в полимерной изоляции во многом определяется величиной локальной напряженности поля и значительно возрастает при перенапряжениях.

5. Проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетике

В зависимости от характера взаимодействия систем все экологические проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) электроэнергетики с ноосферой можно условно подразделить на 5 групп, учитывая, конечно, что в условиях реальной жизни и эксплуатации фактически они в значительной степени переплетаются между собой и частично дублируют друг друга (рис.5.1).

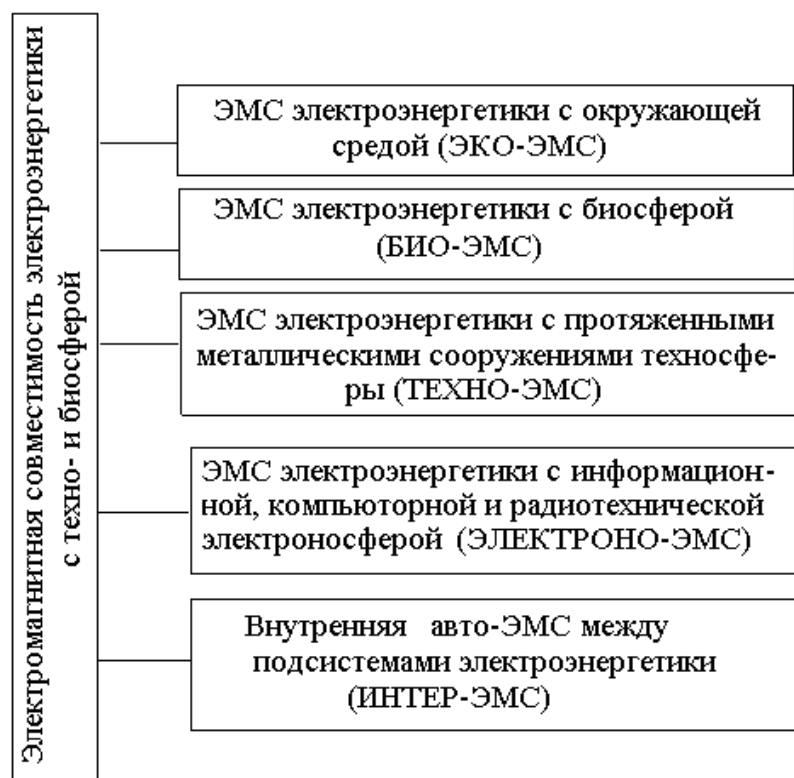


Рис. 5.1. Основные экологические проблемы ЭМС электроэнергетики и ноосферы

При этом необходимо учитывать, что в соответствии с основной характеристикой ноосферы по В.И.Вернадскому как непрерывно развивающейся и расширяющейся сферы жизнедеятельности человеческого общества, создаются все более деликатные, миниатюрные и быстродействующие системы. Они постоянно требуют ужесточения нормативов допустимых внешних воздействий, новых мер защиты и защитных устройств, обеспечивающих ЭМС систем электроэнергетики с другими системами ноосферы.

5.1. Электромагнитная совместимость электроэнергетики с окружающей средой (ЭКО-ЭМС)

Схематически основные экологические проблемы ЭМС электроэнергетики с окружающей средой представлены на рис.5.2. Рассмотрим их краткую характеристику.

Атмосферное электричество. Основными экологическими источниками



Рис. 5.2. ЭМС электроэнергетики с окружающей средой (ЭКО-ЭМС)

наиболее тяжелых и частых нарушений нормальной работы энергетических систем являются грозовые разряды. Опыт эксплуатации показывает, что в каждые 100 км линии электропередачи (ВЛ) в среднем в течение "грозового сезона" (с мая по октябрь) ударяет несколько десятков повторных разрядов молний, по большей части - отрицательной полярности. Эквивалентное сопротивление молнии в первый момент достигает многих десятков килоом, но с увеличением тока молнии и разогревом ее канала сопротивление уменьшается до сотен Ом. Кратковременное напряжение в месте удара молнии может достигать многих миллионов вольт, что вполне достаточно для пробоя изоляции практически любой линии электропередачи, вплоть до

УВН. От места удара по проводам линии распространяются волны перенапряжения. Они, дойдя до электростанции или подстанции, могут повредить изоляцию генератора, трансформатора и другого оборудования. Для защиты от прямых ударов молний над проводами линий устанавливают тросы, а на подстанции - вертикальные молниеотводы. Для защиты от обратных перекрытия с пораженной опоры на провода необходимо каждую опору заземлить с малым (до 10 Ом или несколько больше в районах с высоким удельным сопротивлением земли) сопротивлением заземления. Для защиты оборудования подстанции применяют специальные разрядники или ограничители перенапряжений (ОПН).

При ударе молнии возникают также индуктированные напряжения вследствие емкостных (электрическая составляющая) и индуктивных (магнитная составляющая) связей между каналом молнии и опорами, а также проводами ЛЭП. Они представляют опасность для изоляции сетей среднего (6-35 кВ) и низкого напряжения, особенно для сетей промышленной энергетики.

Удары молнии могут вызвать также пожары (пожароопасных сооружений) и даже взрывы (для взрывоопасных емкостей, таких как, например, нефте- и газохранилища электростанций).

Электрохимическая коррозия. Огромное значение имеет электрохимическая коррозия подземных сооружений электроэнергетики. Электрическое поле блуждающих токов в земле инициирует протекание уравнивающих токов в подземных металлических устройствах (заземляющих устройствах электростанций, подстанций и опор линий электропередачи, оболочках подземных кабелей, трубопроводах, железнодорожных рельсах и т.д.). Электрохимическое разрушение металла происходит в местах выхода ионов из металла в окружающую среду (местном - язвенная коррозия, или общем - сравнительно равномерный переход частиц металла в окружающую почву).

При нормальном симметричном режиме работы трехфазной линии электропередачи в земле протекает лишь незначительный уравнивающий ток промышленной частоты нулевой последовательности. В несимметричном режиме работы трехфазной линии в земле протекает переменный ток промышленной частоты. Вследствие влияния поверхностного аффекта этот ток концентрируется вблизи поверхности земли и в основном - под проводами линии в пределах полосы с шириной, приблизительно равной

$$b = 700 \sqrt{\rho_3 / f}, \quad (5.1)$$

где ρ_3 - удельное сопротивление земли (Ом·м); f - частота (Гц). Так, например, при $\rho_3 = 100$ Ом·м и $f = 50$ Гц, $b = 1000$ м. Кроме того, переменный ток вызывает значительно меньшую электрохимическую коррозию, чем постоянный. Поэтому основным источником электрохимической коррозии является блуждающий постоянный ток, область протекания которого практически не ограничена. Блуждающий ток вызывается несимметричными линиями, работающими на постоянном токе (трамвай, электрифицированная

железная дорога, линия электропередачи постоянного тока, если она работает в несимметричной режиме).

Наиболее интенсивной электрохимической коррозии подвергаются рабочие заземляющие устройства электропередач постоянного тока высокого напряжения. Особенно интенсивно корродируют устройства, работающие в анодном режиме, когда ионы металла переходят из электрода в грунтовые воды и окружающую почву. Эти заземления, устраивают на значительной глубине и вдали от других подземных сооружений, чтобы уменьшить коррозию последних. В качестве заземлителей используются массивные электроды.

Механизм электрохимической коррозии протяженных подземных оболочек кабелей, трубопроводов и т.п. вследствие воздействия блуждающих постоянных токов (и в значительно меньшей степени - переменных) заключается в следующем: блуждающий ток втекает в проводник на катодных участках, где их напряжение оказывается отрицательным по отношению к окружающему грунту. При этом избыточные электроны переходят из металла в электролит грунта. На анодном же участке проводник заряжен положительно, ток вытекает из проводника, ионы металла переходят в грунт и проводник (оболочка кабеля, трубопровод или заземлитель) разрушается. Особую опасность представляет локальная "язвенная" коррозия. При этом происходит местное разрушение всей толщи оболочки кабеля или трубопровода, образуется сквозное отверстие, изоляция кабеля увлажняется, и значительная длина кабеля выходит из строя. В случае трубопровода возможен взрыв выходящего из него газа через образовавшееся отверстие под давлением. Для этого достаточно возникающих от трения газа искр или повышенного блуждающего тока от проходящего в месте пересечения с трубопроводом электропоезда.

Чтобы уменьшить интенсивность коррозии, необходимо удалить подземный проводник от зоны блуждающих токов, устроить "дренаж" отвод блуждающих токов на специальные электроды, применять "анодную" защиту (т.е. принудительно сообщить защищаемому проводнику отрицательное напряжение, включив дополнительный источник постоянного напряжения между этим проводником, специально проложенным дополнительным заземлителем).

Под действием агрессивных включений в атмосфере (например, вблизи химических или цементных заводов и т.п.) возникает ускоренная коррозия висящих в воздухе многожильных стальных тросов и в значительно меньшей степени сталеалюминевых проводов линий электропередач. Для их защиты рекомендуется соответствующая смазка, которая должна покрывать каждую жилу многожильного провода или троса, а в особо угрожаемых случаях даже перейти на сталеалюминевые тросы.

Электромагнитные бури. Солнце, наряду с инфракрасным (тепловым), световым и ультрафиолетовым излучением, особенно в годы "активного" солнца приблизительно одиннадцатилетнего периода, выбрасывает огромное количество электронов, протонов, нейтронов и альфа-частиц. Пролетая мимо

Земного шара и взаимодействуя с магнитным полем вращающейся земли, они индуцируют в земной поверхности электродвижущие силы, медленно меняющиеся во времени (порядка секунд и более). Величина э.д.с. даже в периоды наиболее интенсивных электромагнитных бурь колеблется от долей до единиц вольт на километр. Она в северном полушарии ориентирована на меридиональное направление.

В протяженных линиях электропередач возникают медленно меняющиеся уравнивающие токи, которые могут достигать десятков и даже сотен ампер. Протекая через обмотки трансформаторов, они вызывают насыщение магнитопроводов и многократное увеличение тока намагничивания. Кроме того, выход на нелинейный участок кривой намагничивания трансформатора сопровождается протеканием по линии, кроме вышеуказанного уравнивающего тока нулевой последовательности, также и токов четных и нечетных гармонических. Это может вызвать ложные отключения дальних линий электропередачи вследствие неверной работы релейной защиты, росту перетока мощности по параллельным линиям и их перегрузке с последующим отключением, т.е. к системной аварии, сопровождающейся нарушением электроснабжения потребителей на большой территории и большим ущербом. Эти обстоятельства необходимо учитывать при разработке релейной защиты дальних электропередач.

Экологические последствия. Линии электропередачи СВН и УВН создают неблагоприятные экологические последствия для окружающей местности вследствие сооружения массивных (высота до 60 м, а в отдельных случаях при пересечении водных преград и до сотен метров) опор и подвески на них трёх проводов с расщеплением на 3-4 и до 12 составляющих каждый, расположенных по окружности радиуса до 1-2 м, а также двух грозозащитных тросов.

Эти обстоятельства могут иметь существенное значение при прохождении линии через или вблизи заказников, заповедников, крупных городов, а также в курортных местностях.

Линии всех классов напряжения, кроме того, требуют соответствующих отчуждений земляных участков и усложняют выполнение сельскохозяйственных работ в местах установки опор.

5.2. Электромагнитная совместимость электроэнергетики с биосферой (БИО-ЭМС)

Схематически основные проблемы ЭМС электроэнергетики с биосферой представлены на рис.5.3. Рассмотрим их краткую характеристику.

Опасные напряжения прикосновения и шага. Главным источником опасности для человека представляет ток, который протекает через тело человека при прикосновении к частям электроустановки, находящимся под различными потенциалами. Первое ощущение (легкий зуд в ладони, охватывающей электрод - источник тока) возникает уже при токах $I_{\text{ощ}} = 0,6-1,5$ мА, при увеличении тока до $I_{\text{нот}} = 4-6$ мА у отдельных людей уже

происходит затруднение разжатия руки ("эффект неотпускания"), а при токах 20–25 мА этот эффект наступает практически у всех людей. Дальнейшее увеличение тока приводит к обмороку и затем к параличу дыхания и гибели человека, попавшего под напряжение. Особую опасность представляет протекание тока в области сердца - могут возникнуть неуправляемые сокращения отдельных групп мышечных волокон с частотой приблизительно на порядок выше нормальной (фибрилляция), прекращается пульсация сердца и останавливается кровообращение. Это состояние может продолжаться и после того, как ток прекратился.



Рис. 5.3. Электромагнитная совместимость электроэнергетики с биосферой

Пороговые значения токов ощущения $I_{\text{ощ}}$, неотпускания $I_{\text{нот}}$ и фибрилляции $I_{\text{ф}}$ имеют большой статистический разброс для различных людей. Статистическое распределение пороговых значений осязаемого тока $I_{\text{ощ}}$ и неотпускающего тока $I_{\text{нот}}$ для различных людей в первом приближении подчиняется нормальному закону с плотностью распределения:

$$f(I_{\text{п}}) = \frac{1}{(\sigma_{\text{п}} \sqrt{2} \cdot \pi)} \cdot \exp \left[-\frac{(I_{\text{п}} - m)^2}{2\sigma_{\text{п}}^2} \right], \quad (5.2)$$

с математическими ожиданиями соответственно $I_{\text{ощ}}=m=1,1$ мА, $I_{\text{нот}}=m=14,9$ мА и среднеквадратическими отклонениями $\sigma_{\text{п}} = \sigma_{\text{ощ}} = 0,15$ мА и $\sigma_{\text{п}} = \sigma_{\text{нот}} = 3,2$ мА соответственно для пороговых значений осязаемого и неотпускающего тока.

Пороговые значения фибрилляционных токов I_{ϕ} подчиняются в первом приближении логнормальному закону с плотностью вероятности

$$f(I'_{\phi}) = \frac{1}{(\sigma_{\phi} \sqrt{2\pi})} \cdot \exp\left[-\frac{(I'_{\phi} - m)^2}{2\sigma_{\phi}^2}\right], \quad I'_{\phi} = \lg(I_{\phi}), \quad (5.3)$$

причем $m = \lg(\bar{I}_{\phi})$ и σ_{ϕ} существенно зависят от длительности протекания тока в диапазоне $0,1 < t < 1$ с. В первом приближении остается постоянным произведение $q_{\phi} = I_{\phi \min} \cdot t_i = 0,07$ К, соответствующее практически достаточно малой вероятности фибрилляции (при $\lg I'_{\phi \min} = m - 3 \cdot \sigma_{\phi}$), $P = 0,0014$.

В реальных условиях величина тока зависит от разности напряжений между точками контактирования рука-нога (напряжение прикосновения) или нога-нога (напряжение шага), а также от сопротивления тела человека (1000-10000 Ом) и переходных сопротивлений в местах контактов, которые могут варьировать в весьма широких пределах 100–10000 Ом.

Поэтому нормы напряжений прикосновения или шага, исходя из наиболее неблагоприятных значений сопротивлений, принимаются согласно табл. 5.1.

Таблица 5.1
Допустимые напряжения прикосновения и шага для электроустановок
высокого напряжения

Время воздействия t_i	0,01-0,08	0,1	0,3	0,5	1	1
Допустимые напряжения прикосновения или шага $U_{\text{пр}}$ или $U_{\text{ш}}$, В	650	500	165	100	50	36
$U_{\text{пр}} \cdot t_i$, В·с	50	50	50	50	50	-

Наиболее опасные напряжения прикосновения и шага возникают на подстанциях 110 кВ и выше в сетях с глухим заземлением нейтралей трансформаторов. В большинстве случаев для обеспечения безопасности обслуживающего персонала на таких подстанциях устраивают контур защитного заземления с сопротивлением растекания не более $R = 0,5$ Ом. Контур охватывает всю подстанцию, а внутри его для обеспечения безопасного напряжения шага прокладывают в земле полосы, а для безопасного напряжения прикосновения вокруг оборудования (выключатели, трансформаторы и т.п.) прокладывают дополнительные контуры, выравнивающие распределение напряжения на поверхности земли. В местностях с высоким удельным сопротивлением земли допускается некоторое увеличение R_z , но напряжения $U_{\text{пр}}$ и $U_{\text{ш}}$ должны быть ограничены путем прокладки дополнительных полос внутри контура.

На мощных подстанциях ток однополюсного короткого замыкания, протекающий через контур заземления, может достигать и даже превосходить $I_z = 20$ кА. При этом напряжение на заземлении не должно превосходить $U_z = 10$ кВ, но большую опасность может представить вынос опасного напряжения за пределы заземляющего контура протяженными

металлическими устройствами (железнодорожные рельсы, трубопроводы, оболочки кабелей и т. п.). В местах выхода их за пределы заземляющего контура подстанции на них необходимо предусмотреть соответствующие изоляционные устройства.

Специфическую опасность может представить прикосновение человека к крупногабаритному транспорту на резиновом ходу под проводами ВЛ СВН и особенно УВН. Через человека будет протекать ток

$$I_{\text{ч}} = j\omega \cdot (C_A \dot{U}_A + C_B \dot{U}_B + C_C \dot{U}_N), \quad (5.4)$$

где \dot{U}_i и C_i ($i = A, B, C$) соответственно напряжения на фазах А, В, С и емкости между транспортной платформой и фазными проводами.

В случае расположения проводов ЛЭП в одной горизонтальной плоскости наведенное на транспорт напряжение равно в первом приближении

$$U_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{л}} \cdot S^2 \cdot h_{\text{дд}}}{2h \cdot (h + S)} \lg \frac{2h \cdot S}{r_y \sqrt{h^2 + S^2}}; \quad r_y = r_{\text{д}} \sqrt{\frac{nr_i}{r_{\text{д}}}}, \quad (5.5)$$

где $U_{\text{л}}$ - линейное напряжение электропередачи; $r_{\text{э}}$ - эквивалентный радиус расщепленной фазы; $r_{\text{п}}$, $r_{\text{р}}$, n - соответственно радиусы провода, окружности, по которой расположены провода расщепленной фазы; число составляющих проводов; S - расстояние между соседними фазными проводами; h , $h_{\text{тр}}$ - высота проводов ВЛ и платформы транспорта над землей.

Длительное воздействие электромагнитного поля на человека по данным ряда биоэлектромагнитных исследований и статистического анализа заболеваемости различных групп людей может способствовать онкологическим заболеваниям, особенно у детей, а также неблагоприятным мутациям с отдаленными генетическими последствиями.

Мешающие влияния электроэнергетики на биосферу. Исследования научно-исследовательского института гигиены труда и персональной защиты (НИИГТ и ПЗ) и анализ опыта работы показывают, что в нормальном режиме работы ВЛ оказывает неблагоприятное воздействие на окружающее население и особенно на обслуживающий персонал вследствие воздействия магнитного и электрического полей, а также акустических помех.

Под действием магнитного поля затрудняется движение крови в кровеносных сосудах, что вызывает синюшность рук у монтеров, работающих на линиях сильного тока под нагрузкой.

На основе многочисленных жалоб обслуживающего персонала, а также по данным исследований всероссийского научно-исследовательского института охраны труда (ВНИИОТ) установлено, что длительное систематическое нахождение человека в электрическом поле с высокой напряженностью ($E = 5$ кВ/м и выше при отсутствии человека), отрицательно сказывается на его самочувствии. Нормы и правила по охране труда рекомендуют временно (до дальнейшего уточнения) допустимую продолжительность систематического пребывания обслуживающего персонала в электрическом поле (табл. 5.2). Приведенные в таблице 5.2 значения E определяются в наиболее неблагоприятном месте возможного

пребывания человека (при его отсутствии), при условии, что остальное время он находится в местах, где напряженность электрического поля не превышает 5 кВ/м. Кроме того, должны быть приняты меры, исключающие возможность воздействия кратковременных электростатических разрядов на организм человека в рабочих условиях. Значительно сложнее вопрос о нормировании допустимой напряженности электрического поля вблизи линий электропередачи. Длительное систематическое нахождение людей или животных в пределах полосы отчуждения не предусмотрено. Поэтому в настоящее время в качестве допустимой напряженности под проводами для населенной местности обычно принимается $E < 15$ кВ/м и $E < 20$ кВ/м для ненаселенной. За пределами полосы отчуждения, где возможно длительное нахождение детей, напряженность должна быть значительно ниже ($E < 2$ кВ/м).

Акустические помехи высокой интенсивности также неблагоприятно сказываются на самочувствии людей. Под влиянием переменных электромагнитных полей возникают электродинамические силы в отдельных элементах. Они пульсируют с двойной частотой (100 Гц) и создают механическую вибрацию. В зависимости от интенсивности эта вибрация воспринимается человеческим ухом как шорох, гудение или рев. Так, например, у поверхности проводов линий высокого напряжения может возникнуть коронный разряд, создающий значительные добавочные потери энергии, акустические и радиопомехи. Характер и интенсивность короны существенно зависят от амплитуды напряженности E электрического поля у поверхности провода и погоды (иней, изморозь, гололед, дождь).

Таблица 5.2

Гигиенические нормативы напряженности электрического поля для персонала, обслуживающего установки СВН

Напряженность электрического поля E , кВ/м	Допустимая длительность пребывания человека в течение суток $T_{\text{доп}}$, мин
До 5	Без ограничения
5-10	180
10-15	90
15-20	10
20-25	5
Свыше 25	Не допустима

Известна так называемая критическая напряженность короны, кВ/см

$$A_e = 16,5 \cdot \sqrt{2} \cdot m \cdot \delta \cdot [1 + 0,62 / (\delta^{0,3} \cdot r_0^{0,38})], \quad (5.6)$$

где $m = 0,82 \dots 0,85$ - коэффициент негладкости провода.

Если $E > E_k$, то коронирует весь провод и возникает "общая корона", создающая большие потери энергии. Чтобы избежать этого, применяют расщепленные провода, изобретенные одним из ведущих профессоров Ленинградского политехнического института академиком В.Ф. Миткевичем еще в 1910 году. На линии 330 кВ используют фазы, расщепленные на два

составляющих провода, на линии 500 кВ - на три, на линии 750 кВ - на четыре - пять проводов. Такое решение обеспечивает $E = (0,8...0,85) E_k$ и отсутствие общей короны. Однако в точках неоднородности (заусеницы, загрязнения и особенно капли дождя) напряженность оказывается повышенной, и в результате возникает местная корона. Наиболее сильные помехи наблюдаются при морозящем дожде, когда вибрирующими элементами оказываются капли дождя у поверхности провода, поэтому ЛЭП 110-220 кВ при дожде "шуршат" и "шипят", ВЛ 330-500 кВ "гудят", а ВЛ 750 кВ "ревут".

Большие акустические помехи могут возникать также вблизи мощных трансформаторов, автотрансформаторов и реакторов СВН. При этом вибрируют стальные листы магнитопроводов и медные провода обмоток, особенно, если частота собственных, колебаний их элементов близка к 100 Гц.

5.3. Электромагнитная совместимость электроэнергетики с протяженными металлическими сооружениями техносферы (ТЕХНО-ЭМС)

Схематически основные проблемы ЭМС электроэнергетики с протяженными металлическими сооружениями представлены на рис.5.4. Рассмотрим их краткую характеристику.

Опасные влияния на промышленной частоте. Под "опасным" влиянием на протяженные металлические сооружения техносферы будем понимать такое влияние, при котором индуктированные напряжения в цепях линий связи (ЛС), транспортных устройствах или других элементах могут создавать опасность для здоровья и жизни обслуживающего персонала, населения и абонентов ЛС, вызывать повреждения аппаратуры и приборов или ложные срабатывания железнодорожной сигнализации. Со всем этим приходится считаться, прежде всего, при наиболее неблагоприятных - аварийных или ненормальных режимах работы сети высокого напряжения.

При несимметричных коротких замыканиях в сети с эффективным заземлением нейтрали возникают большие токи в земле и сильные магнитные поля. Они могут вызвать опасные магнитные влияния. Возникает э.д.с. взаимоиנדукции в находящихся вблизи воздушных и кабельных линиях связи, в цепях железнодорожной сигнализации и блокировки. В таких случаях необходимо применять специальные меры для их защиты.

Правила защиты устанавливают нормативные величины допускаемых значений напряжения на проводах ЛС и продольной э.д.с. взаимоиנדукции. Эти требования учитывают возможные в эксплуатации ЛС различные конкретные ситуации. Так, например, в особо неблагоприятных условиях оказывается монтеры, выполняющие ремонтные работы на подземном кабеле связи в стесненных условиях в кабельном колодце и во влажной земле. При этом допустимо наименьшее напряжение на проводах ЛС, так как сопротивление тела человека может быть минимальным (1000-2000 Ом).

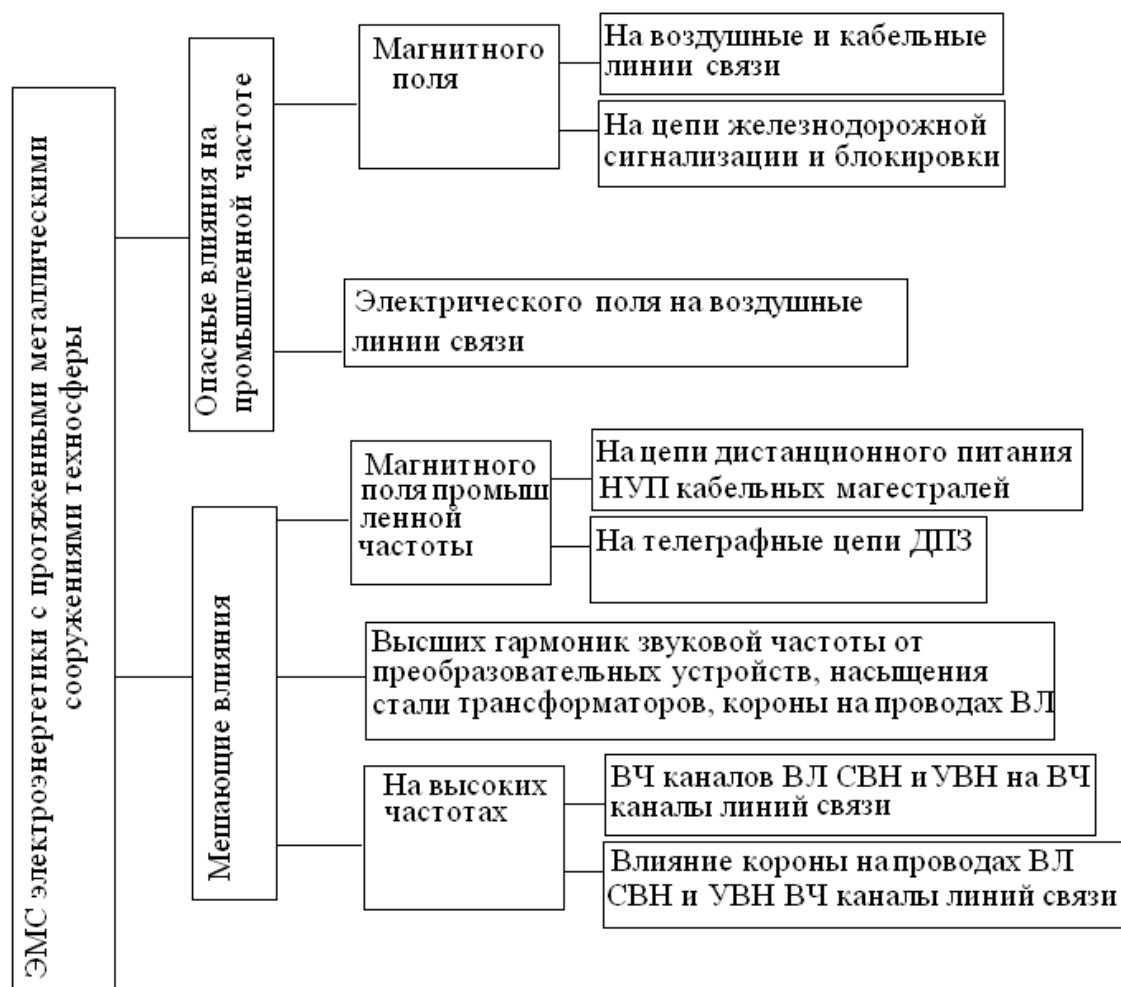


Рис.5.4. ЭМС электроэнергетики с протяженными металлическими сооружениями (ТЕХНО-ЭМС)

В значительно более благоприятных условиях оказываются рабочие, ремонтирующие воздушную ЛС на деревянных опорах. При правильной организации труда рабочие должны быть закреплены монтажным поясом. Тогда инстинктивное отдергивание руки при ударе током не приведет к падению и механической травме. Кроме того, ток, который проходит через монтера, существенно ограничен включенным последовательно сопротивлением деревянного столба, составляющим не менее 10 кОм на каждый метр его длины.

Повреждение аппаратуры и приборов в цепи ЛС может возникнуть в случае, когда суммарное приложенное напряжение окажется выше пробивного напряжения изоляции жил кабеля или аппаратов по отношению к заземленным экранам или к оболочке кабеля.

Электрическая прочность кабелей связи, вводных устройств и аппаратуры при кратковременном воздействии в течение 1...2 с несколько выше, чем испытательное одномоментное напряжение. Однако в условиях эксплуатации вследствие старения изоляции, ее электрическая прочность снижается. В первом приближении можно считать, что эти два обстоятельства взаимно компенсируют друг друга. Кроме того, на кабельных ЛС часто предусматривают дистанционное питание неуправляемых

усилительных пунктов (НУПов). Поэтому правила защиты требуют, чтобы величина кратковременной э.д.с. взаимоиндукции с учетом возможного неблагоприятного наложения напряжения дистанционного питания не превышала испытательного напряжения аппаратуры и кабелей связи.

В длительном режиме работы э.д.с. взаимоиндукции также с учетом напряжения дистанционного питания НУПов при применении соответствующих мер защиты не должна превосходить допустимого рабочего напряжения между жилами кабеля.

При расчетах опасного влияния ВЛ на людей и аппаратуру ЛС необходимо учитывать как нормальный режим работы ВЛ, так и наиболее неблагоприятный аварийный режим к.з. в одной точке. Одновременное наложение к.з. в двух различных удаленных друг от друга точках - маловероятное событие. Оно учитывается в исключительных случаях. Так, например, особо ответственным является влияние ВЛ на цепи железнодорожной полуавтоматической блокировки с блокмеханизмами. При неблагоприятном стечении обстоятельств это влияние может привести к авариям на железной дороге. В этих условиях Правила защиты требуют учитывать даже такую маловероятную возможность, как наложение к.з. на одной ВЛ в двух точках, удаленных друг от друга. Линии 6-35 кВ, работающие в сетях с изолированной нейтралью, при одновременном к.з. двух фаз в разных точках, могут создавать повышенные индуктированные напряжения в цепях железнодорожной блокировки.

Опасность представляет продольная э.д.с. взаимоиндукции E на длине гальванически неразделенного участка сближения

$$E = \sum_{i=1}^n I_i k_i z_i \ell_i, \quad (5.7)$$

где I_i, k_i, ℓ_i - соответственно влияющий ток нулевой последовательности ВЛ, коэффициент защитного действия оболочки кабеля, рельсов, тросов и других экранирующих элементов и длина i -го участка эквивалентного параллельного сближения ВЛ и ЛС; z_i - взаимное сопротивление между ВЛ и ЛС с учетом поверхностного эффекта в земле, вычисленное по формулам или кривым Карсона или по приближенной формуле:

$$Z_i = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \ln \left[\frac{a^2 + (h_1 + h_2 + 2h_0)^2}{a^2 + (h_1 - h_2)^2} \right]; \quad h_0 = \sqrt{\frac{\rho_3}{j\omega\mu_0}}, \quad (5.8)$$

где h_0 - эквивалентная комплексная глубина уровня зеркального отражения магнитного поля в земле; a, h_1, h_2, ρ_3 соответственно ширина сближения, высоты ВЛ и ЛС над поверхностью земли и ее удельное сопротивление.

Для уменьшения влияния ВЛ на ЛС устанавливают разделительные линейные и редуционные трансформаторы. Аппаратура узла связи оказывается отделенной от линии, а участок сближения ограничен двумя соседними разделительными и редуционными трансформаторами.

Правила защиты устанавливают допустимые значения (табл.5.3) продольных э.д.с. взаимоиндукции для линий связи и цепей

железнодорожной блокировки. В тех случаях, когда допустимая, продольная э.д.с. превышает установленную норму, дополнительно к указанным выше разделительным и редуccionным трансформаторам приходится устанавливать разрядники. При этом напряжение на проводе ЛС по отношению к земле, а также падение напряжения на сопротивлениях заземления разрядников при наиболее неблагоприятном к.з. на ВЛ не должно превышать значений, приведенных в табл. 5.3 и 5.4.

Таблица 5.3

Допустимые э.д.с. $E_{\text{доп}}$ и напряжения $U_{\text{доп}}$ для кабельных ЛС и цепей полуавтоматической блокировки

Характеристика цепи	Допустимо, если спасательные меры защиты			
	отсутствуют			имеются
	кратковременно	длительно		длительно
		t, ч	$E_{\text{доп}}, \text{В}$	
Кабельные ЛС без дистанционного питания	$E_{\text{доп}} < U_{\text{исп}}$	< 2 > 2	70 36	$E_{\text{доп}} < U_{\text{раб}}$
То же, с ДП, изолированным от земли	$E_{\text{доп}} < U_{\text{исп}}$	< 2 > 2	70 36	$E_{\text{доп}} < U_{\text{раб}}$
То же, с ДП, и заземленным полюсом источника постоянного тока	$E_{\text{доп}} < U_{\text{исп}} - U_{\text{дп}}(1/\sqrt{2})$	< 2 > 2	70 36	$E_{\text{доп}} < U_{\text{раб}} - U_{\text{дп}}/\sqrt{2}$
То же, с ДП, и заземленной средней точкой источника переменного тока	$E_{\text{доп}} < U_{\text{исп}} - U_{\text{дп}}(1/\sqrt{2})$	< 2 > 2	70 36	$E_{\text{доп}} < U_{\text{раб}} - U_{\text{дп}}/\sqrt{2}$
Цепи полуавтоматической блокировки с блокмеханизмами				
однопроводные	$E_{\text{доп}} < 60 \text{ В}$	> 1		-
двухпроводные	$E_{\text{доп}} < 30 \text{ В}$	> 1		-

Примечания: $U_{\text{исп}}$ -испытательное одноминутное напряжение, В; $U_{\text{раб}}$ - рабочее напряжение между жилами цепей кабеля, В; $U_{\text{дп}}$ - напряжение источника дистанционного питания, В.

Для снижения опасного влияния на ЛС устанавливают дренажные катушки. Можно также вместо железобетонных и стальных опор на ЛС использовать деревянные, для которых допустимые э.д.с. и напряжение значительно выше. На участках тесного сближения иногда приходится заменять воздушную ЛС кабельной. В отдельных случаях необходимо перенести ЛС дальше от ВЛ и тем самым существенно уменьшить влияние ВЛ.

Ряд мер, способствующих снижению опасных влияний, можно осуществить и на ВЛ. К их числу относятся:

- 1) установка на ВЛ хорошо проводящих (сталеалюминевых) заземленных тросов;
- 2) частичное разземление нейтралей трансформаторов для уменьшения токов однофазного к.з.;
- 3) автоматический контроль состояния изоляции ВЛ с изолированной нейтралью и быстрое отключение поврежденного участка, чтобы исключить к.з. в 2-х точках;

Таблица 5.4

Допустимые э.д.с. и напряжения относительно земли для воздушных ЛС

Характеристика цепи	Допустимо, если разрядники:					
	отсутствуют				установлены	
	кратковременно		длительно		кратковременно	
	t, ч	E _{доп} , В	t, ч	E _{доп} , В	t, с	E _{доп} , В
Воздушные ЛС на железобетонных или металлических опорах	< 0,15	320	< 2	70	-	-
	0,15-0,3	240	> 2	36	-	-
	0,3-0,6	160			-	-
	> 0,6	120			-	-
Воздушные ЛС на деревянных опорах, в т.ч. с железобетонными приставками	< 0,15	2000	< 2	120	< 0,15	1300
	0,15-0,3	1500	> 2	60	0,15-0,3	1000
	0,3-0,6	1000			0,3-0,6	750
	> 0,6	750			> 0,6	500

4) перевод воздушной линии в кабельную в городских условиях, а также в пересечениях с ВЛ.

В отдельных случаях, когда ЛС находится в непосредственной близости от ВЛ 6-35 кВ в сети с изолированной или резонансно-заземленной нейтралью, приходится учитывать также возможность опасного электрического влияния ВЛ на ЛС. Такая опасность может возникнуть при замыкании на землю одной фазы ВЛ 6-35 кВ, так как при этом на остальных двух фазах напряжения повышаются до линейных, а сдвиг фаз между ними может быть порядка 60°, а в случае дугового замыкания на землю имеют место, кроме того, многократные зажигания и погасания электрической дуги, сопровождающиеся бросками тока и напряжения на здоровых и аварийных фазах линии.

Мешающие влияния электроэнергетики на протяженные металлические сооружения техносферы. Такие влияния возникают вследствие помех, которые создаются сетями высокого напряжения в условиях длительного нормального режима их работы. Они не представляют непосредственной опасности для сооружений техносферы, однако ухудшают качество ее работы, снижают надежность или создают затруднения для нормального функционирования связи, телевидения, радио и т.д..

Сети высокого напряжения индуктируют в элементах техносферы токи и напряжения промышленной частоты 50 Гц, а также звуковых частот (высших гармоник (150-5000 Гц) и высокой частоты (20 кГц и более)).

В кабельных линиях связи функционируют многочисленные высокочастотные каналы связи. Вследствие сильного затухания высокочастотных каналов через каждые 5-15 км приходится устраивать неуправляемые усилительные пункты (НУП). На линиях связи одновременно с телефонной связью по схеме провод-провод широко применяется для телеграфа схема два провода земля (ДПЗ). При этом удается значительно уменьшить мешающее влияние телеграфа на телефонные каналы. Магнитное поле, образованное рабочими токами 50 Гц ВЛ, обуславливает мешающее

влияние на электрические цепи, в которых земля используется в качестве обратного провода. К их числу относятся цепи дистанционного питания НУП, телеуправления и телесигнализации, а также низкочастотный телеграф, работающий по схеме ДПЗ.

Токи и напряжения высших гармоник ВЛ оказывают мешающие влияния на каналы звуковой частоты линий связи. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения возникают главным образом вследствие работы полупроводниковых преобразовательных устройств, электроплавильных печей, электросварочных агрегатов и из-за насыщения стали трансформаторов. Токи и напряжения высших гармоник не участвуют в передаче полезной электроэнергии, они создают добавочные потери, и понижают к.п.д. электропередачи. Поэтому их стараются по возможности уменьшить. Как правило, они не превышают нескольких процентов от основного рабочего тока или напряжения. Основная работа линий связи осуществляется по высокочастотным каналам, а каналы тональной (звуковой) частоты используются главным образом для служебной связи. Однако тональные каналы могут оказаться основными в чрезвычайных условиях, особенно при сильном гололеде на проводах линий связи, когда сигналы в высокочастотных каналах сильно затухают. В этих случаях мешающее влияние ВЛ на высших гармониках может иметь существенное отрицательное значение и Правила предусматривают соответствующие меры по их ограничению.

Импульсы токов короны на проводах ВЛ СВН и УВН и изоляторах ВЛ 35-220 кВ, накладываясь друг на друга, со смещением в пространстве (вдоль длины линии) и во времени, создают общий уровень высокочастотных помех в широком диапазоне частот 20...2000 кГц. Одновременно в линиях всех напряжений от 6 кВ и выше работают каналы высокочастотной связи в диапазоне 30...300 кГц. Надежная работа этих каналов может быть обеспечена, если уровень сигналов по ним значительно превышает уровень помех от короны. В воздушных линиях связи также работают многочисленные ВЧ каналы. Правила рекомендуют мероприятия, обеспечивающие достаточно малое влияние ВЧ каналов ВЛ и ВЧ помех от короны на ВЧ каналы ЛС, по которым идет основная работа связи.

За пределами полосы отчуждения должен быть обеспечен достаточно низкий для приемников уровень радиопомех от короны на проводах и от преобразовательных устройств на подстанциях постоянного тока. При этом необходимо учитывать, что частичные разряды и корона на изоляторах создают также телевизионные помехи в области УВЧ.

5.4. Электромагнитная совместимость электроэнергетики с электроносферой (ЭЛЕКТРОНО-ЭМС)

Схематически основные проблемы ЭМС электроэнергетики с информационной, компьютерной и радиотехнической электроносферой представлены на рис.5.5.



Рис.5.5. ЭМС электроэнергетики с информационной, компьютерной и радиотехнической электросферой (ЭЛЕКТРОНО-ЭМС)

Опасные влияния. Перенапряжения в питающей сети, а также даже самые кратковременные скачки напряжения в питающей сети могут привести к пробое изоляции или выходу из строя элементов электронной, особенно полупроводниковой техники, и тем самым вывести из строя ЭВМ, подчас в наиболее ответственный момент, когда требуется особенно четкая и бесперебойная работа. Специфическое опасное влияние может возникнуть вследствие гальванического влияния со стороны заземления при внезапном к.з. в питающей сети на землю.

Мешающие влияния. Неустойчивое напряжение, "скачки" напряжения, а также высшие гармоники источников питания промышленной частоты, как правило, не опасны для компьютерной электронной техники, но вызывают сбои и нечеткую работу ЭВМ и требуют включения источников питания через соответствующие фильтры. Весьма важно, чтобы совместно работающие блоки электронной техники были заземлены в одной точке, так как уравнительные токи, возникающие между отдельными "землями", часто оказываются источником нежелательных помех вследствие емкостных или индуктивных электромагнитных наводок или гальванических влияний на интегральные схемы. Близко расположенные и недостаточно

экранированные мощные электрические цепи могут создавать такие электромагнитные наводки в цепях питания и внутренних цепях ЭВМ, которые существенно затруднят их работу.

Частоты функционирования практически всех устройств электроносферы значительно выше промышленной частоты 50 Гц. Однако всевозможные высокочастотные электромагнитные колебания в цепях электроэнергетики создают нежелательные помехи в указанных устройствах, расположенных вблизи мощных электроэнергетических установок. Повторные зажигания и погасания электрической дуги возникают между контактами высоковольтных аппаратов, особенно - разъединителей. Зажигания и погасания дуги возбуждают в коммутируемых контурах электромагнитные колебания, создающие помехи в расположенных вблизи от них электронных схемах.

Отмеченные в п.5.4 токи высокой частоты, возникающие в проводах ВЛ вследствие короны, а также токи каналов ВЧ связи по этим проводам генерируют в окружающем пространстве электромагнитные поля, создающие радиопомехи в расположенных вблизи радиоприемных устройствах.

Отмеченные в п.5.1 экологические последствия от крупногабаритных сооружений нарушают условия распространения радиоволн и искажают показания радиомаяков и других направленных радиопередач.

5.5. Внутренняя электромагнитная совместимость между подсистемами электроэнергетики (ИНТЕР-ЭМС)

Нарушения электромагнитной совместимости между различными подсистемами самой электроэнергетики приводят (рис.5.6) к крайне нежелательным последствиям для нее: коммутационные, дуговые и квазистационарные перенапряжения в сетях высокого напряжения вызывают повреждения изоляции, короткие замыкания, отключения и погашения потребителей и большой народнохозяйственный ущерб. Необходимо поддерживать достаточно высокий уровень изоляции и предусмотреть установку разрядников или ОПН на линиях СВН и УВН.

Аварии и оперативные коммутации вызывают опасные и мешающие влияния цепей высокого напряжения "первичной коммутации" на цепи "вторичной коммутации" с электронными устройствами информационной и компьютерной техники электростанций и подстанций высокого напряжения. Они аналогичны рассмотренным влияниям на устройства электроносферы и могут привести к выходу из строя или неселективной работе устройств вторичной коммутации в наиболее ответственные моменты аварий или коммутаций цепей первичной коммутации, когда от цепей вторичной коммутации требуется особенно четкая, селективная и бесперебойная работа (см.п. 5.4).

В электроэнергетике очень широко используется ВЧ связь, и возникают проблемы, аналогичные рассмотренным в п.11.5. Кроме того, на подстанциях с мощными трансформаторами возможно возникновение помех

между ВЧ каналами на линиях разного класса напряжения вследствие емкостных связей между обмотками этих трансформаторов.

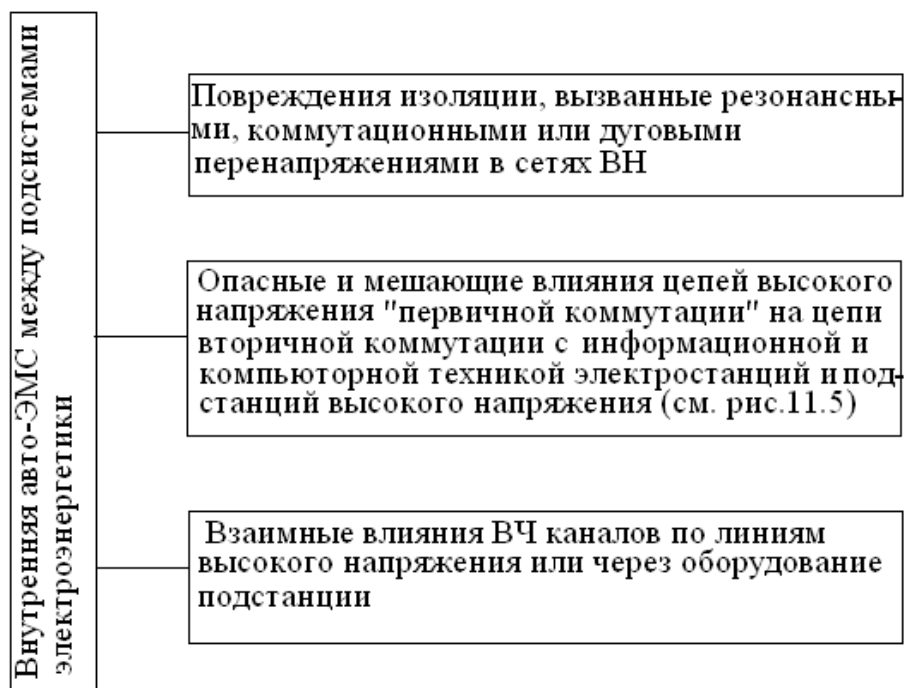


Рис.5.6. Внутренняя ЭМС между подсистемами электроэнергетики (ИНТЕР-ЭМС)

Таким образом, обеспечение электромагнитной совместимости между объектами электроэнергетики с другими техническими структурами и биологическими объектами создает предпосылки надежной и бесперебойной работы не только других объектов, но и элементов электроэнергетики.

Из приведенного выше следует, что к проблеме перенапряжений и защиты от них непосредственному отношению имеют ЭКО-ЭМС и ИНТЕР-ЭМС. Меры и мероприятия по обеспечению ограничения перенапряжений в целом улучшают ЭМС-обстановку в стране.