

## Общие рекомендации по защите антенных систем от грозовых разрядов

Постоянно на Земле происходит порядка 2000 гроз, и каждую сотую часть секунды разряд молнии достигает ее поверхности. Металлические башни подвержены наиболее частому попаданию молний чем другие сооружения. Причина очевидна: башни и мачты превосходят по высоте окружающие объекты и являются хорошими проводниками. К сожалению, **удар молнии не может быть предотвращен**. Это исключая экзотические случаи применения ионизаторов для инъекции положительных ионов в область, прилегающую вершине мачты для создания полевого эффекта.

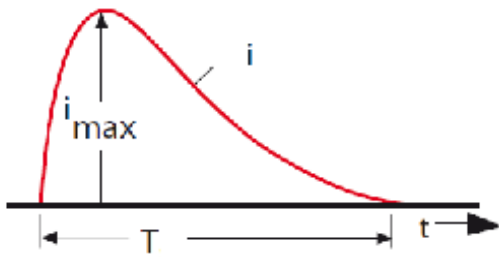


Грозовая активность зависит от удаленности от экваториальной области Земного шара, и статистика ее проявления отражена в World map of isokeraunic level — карте среднего числа дней в году, когда слышен гром. Для нашего региона частота гроз составляет 40 в год, и любая из них может вывести ваше оборудование из строя.

Чтобы представить масштаб процессов, происходящих во время грозы, обратимся к средним характеристикам шторма.

Напряженность поля около центра грозового облака составляет 1000В/м, что образует разность потенциалов между заряженными участками 100 - 1 000МВ. Когда электрическое поле вблизи одного из центров сосредоточения отрицательных зарядов вырастает до критического значения (около 10кВ/см), формируется ионизированный канал, распространяющийся от облака к земле со скоростью в одну десятую долю от скорости света. Во время вспышки рассеивается энергия порядка 1 000 — 10 000МДж. Основная ее часть расходуется на разогрев канала, температура которого достигает 15 000 — 20 000С за несколько десятков микросекунд. В среднем сила тока в разряде составляет десятки кА.

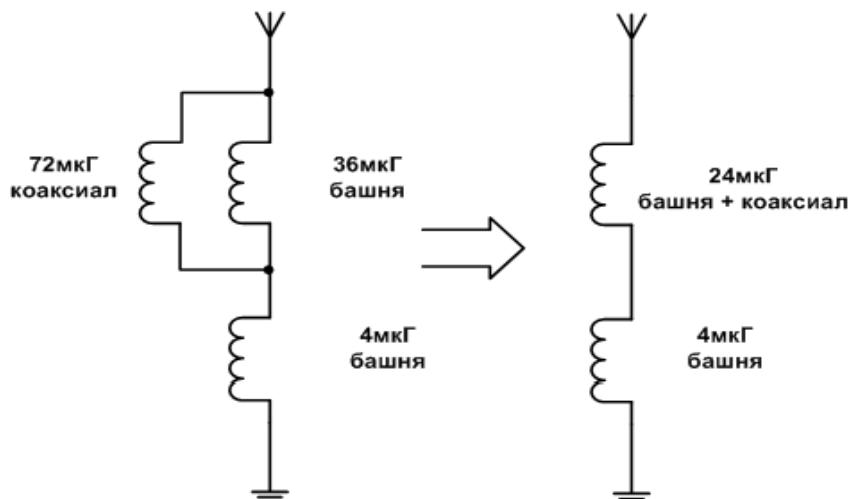
Прямое и не прямое попадания разряда сопровождаются главным образом электрическими процессами кондуктивного и индуктивного характера. Накопление электрического заряда непосредственно перед ударом незначительно, если система хорошо заземлена. Стандарт IEEE предлагает в качестве модели разряда импульс 8/20мсек 3кА, появление которого наиболее вероятно на входе устройства при прохождении разряда по башне.



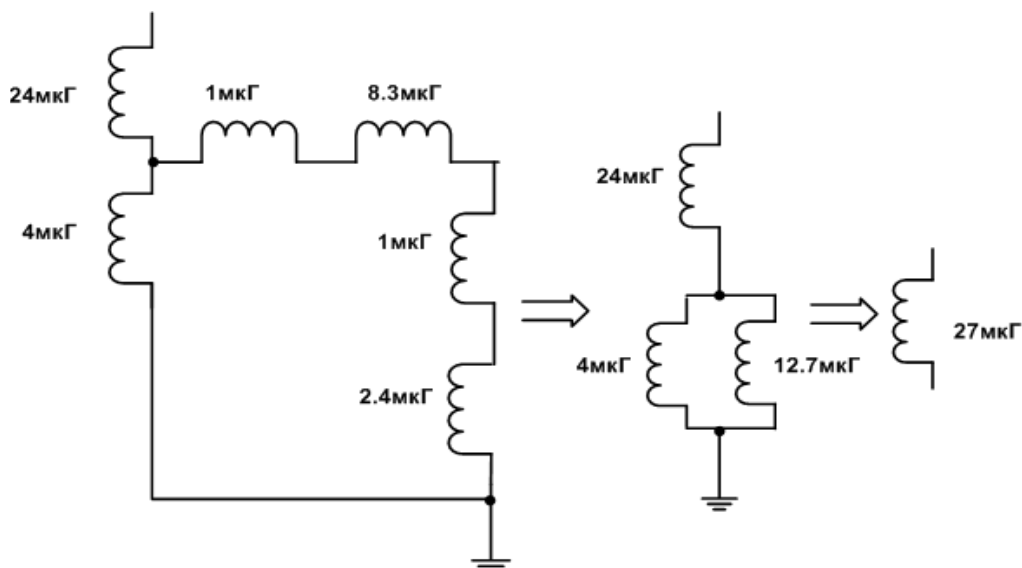
Форма импульса определяется характером цепи по которой проходит ток. Чаще всего в рассуждениях о физике процесса исходят только из соображений омических свойств конструкции. Однако типичное значение сопротивления для них не превосходит значения 0.001 Ом. В то же время каждый проводник обладает индуктивностью, величина которой определяется его геометрией. 50-метровая башня с основанием 1 x 1м имеет индуктивность порядка 50мкГ. Той же длины коаксиальный кабель диаметром 1/2" обладает индуктивностью около 80мкГ.

За время фронта импульса энергия накапливается в магнитном поле конструкции. Далее происходит спад, обусловленный обратным преобразованием энергии. Типичный удар молнии сопровождается 2-х миллисекундным нарастанием тока до 90% его максимальной величины и 10 — 50-ти миллисекундным спадом до 50%. Пиковое значение тока достигает 18кА для первого импульса в половине случаев. Для 10% молний значение тока превышает уровень 65кА и только в 1% случаев ток превышает 140кА. Самый мощный из зафиксированных случаев разряда был около 400кА.

Теперь предположим, что с башни высотой в 50м спускается кабель длиной 45м. Его индуктивность составит 72мкГ. Если этот кабель имеет устройства заземления на верхушке башни, как это должно быть, и на уровне 5м от основания башни, тогда общая индуктивность будет выглядеть так:



Далее. Пусть от башни сделан отвод длиной 7м, который соединяется с 2-х метровой шиной заземления здания. Общая индуктивность этого пути составит 12.7мкГ. Для учета двух загибов проводников добвим 1мГ.



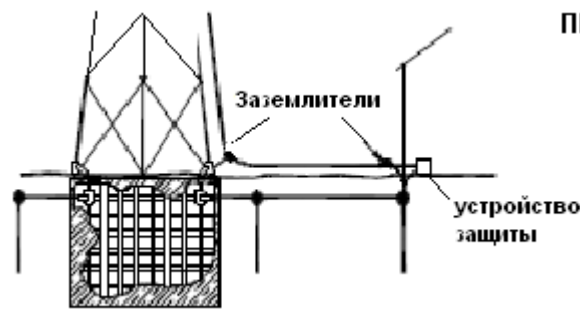
При прохождении импульса тока разряда с фронтом 2мксек и силой 18кА через такую цепь получим бросок напряжения равный  $L \, di/dt$  - 243кВ между вершиной башни и ее основанием. При этом величина тока, проходящего по экрану кабеля и шине заземления, составит 4.3кА, а разность потенциалов между точкой подключения оборудования и «землей» — 7.3кВ.

Прохождение разряда по мачте сопровождается еще одним физическим процессом — взаимной индукцией, вызванной пересечением силовых линий магнитного поля одного проводника с током другого проводника. Первым из проводников будем считать башню, а вторым — коаксиальный кабель. Коэффициент  $k$  взаимной индукции в данном случае приблизительно составит величину 0.166. Из формулы  $M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$ , где  $L_1$  — индуктивность опоры, а  $L_2$  — индуктивность кабеля, получим вносимую в цепь индуктивность 8мкГ. Это довольно значительная величина. При прохождении тока 18кА за 0.2мкс через такую индуктивность получим дополнительно 80.2кВ!

Стоит обратить внимание, что на высоких башнях (более 50м) при установке заземления на кабеле в двух точках — месте установки антенны и отвода в помещение — образуется большая разность в индуктивностях проводников. Эффект взаимной индукции может привести к появлению обратной ЭДС в коаксиальной линии. При этом в какой-то точке, ближе к центру конструкции, возникнет большая разность потенциалов между экраном кабеля и элементами опоры, которая приведет к возникновению дуги. Кабель в этом случае будет поврежден. Поэтому желательно устанавливать промежуточные заземлители на кабеле.

Необходимо помнить, что шина заземления в месте ввода кабеля в помещение в условиях, рассмотренных выше, пропускает ток 4.3кА и имеет потенциал относительно нуля 7.3кВ. Таким образом точка заземления выступает теперь как источник энергии, которая передается к оборудованию. Поэтому можно сказать, что в большинстве случаев установки заземлений оно выполнено не лучшим образом, и, как правило, поражение оборудования обусловлено именно этим. Если вам говорят, что показания омметра свидетельствуют о наличии «хорошего заземления», помните, что это справедливо только для постоянного тока, и при попадании молнии такое «заземление» не работает.

Ниже на рисунке изображены способы установки заземлений в порядке от наиболее предпочтительного варианта к приемлемому.



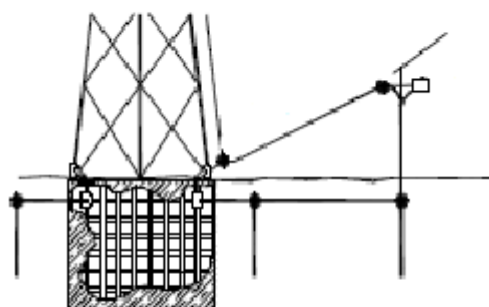
Наилучший

**ПРЕИМУЩЕСТВА**

Низкое значение  $L \, di/dt$

**НЕДОСТАТКИ**

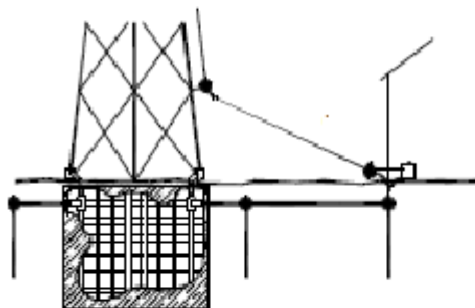
Заход в здание на уровне пола



Хороший

Низкое значение  $L \, di/dt$  у башни

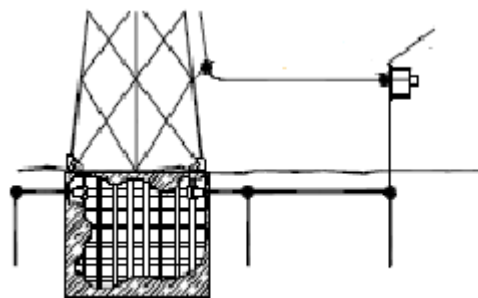
1. Высокое значение  $L \, di/dt$  на входе
2. Наклонный участок кабеля пересекает линии магнитного поля башни



Нормальный

Низкое значение  $L \, di/dt$  на входе

1. Кабель входит на уровне пола
2. Наклонный участок кабеля пересекает линии магнитного поля башни

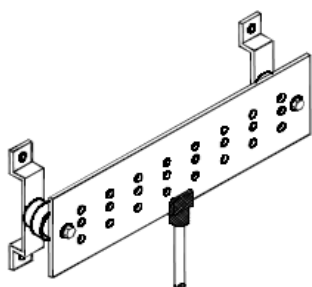


Приемлемый

1. Высокий вход в здание
2. Кабель не пересекает линий магнитного поля башни

Высокое значение  $L \, di/dt$  на входе

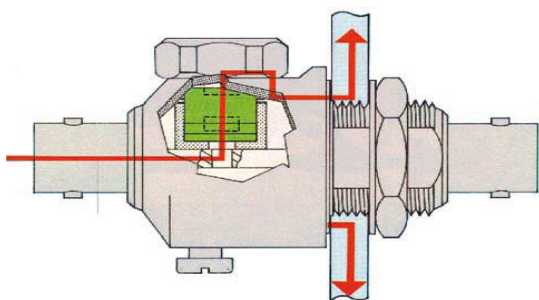
Обычно заземление кабелей на входе в здание выполняется способом как изображено на рисунке:



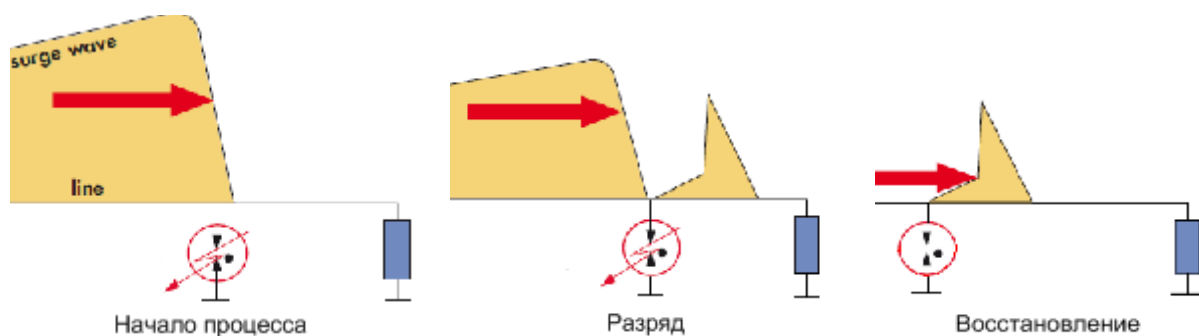
Такое исполнение также является малоэффективным ввиду большой индуктивности заземляющего провода. Поскольку ее величина пропорциональна отношению длины проводника к площади поперечного сечения, то предпочтительнее провод заземления выполнять в виде широкой прямоугольной пластины или ленты. Минимальный размер поперечного контура пластины определяется из соображений его равенства сумме длин окружностей *всех* кабелей, подключенных к заземлителю.

Техника защиты оборудования сайтов от грозовых разрядов предусматривает также установку устройств, препятствующих распространению скачков напряжения по центральному проводнику кабеля. Напряжение на центральном проводнике возникает благодаря трансферу импеданса, который зависит только от конструкции кабеля. Трансфер импеданса - такая же характеристика как волновое сопротивление или затухание на единицу длины. Суть эффекта заключается в том, что ток, протекающий по внешней поверхности экрана наводит напряжение на внутренней поверхности. Этот процесс носит частотно зависимый характер и в наибольшей степени проявляется на низких частотах, т.е. как раз в области концентрации энергии грозового разряда.

Импульс тока на внутреннем проводнике благодаря большей индуктивности растягивается по времени и составляет примерно половину амплитуды. Для защиты от скачка напряжения, вызванного этим импульсом применяются устройства грозозащиты, которые при превышении порогового напряжения на входе отводят избыточную энергию на землю. Существуют различные типы устройств защиты. Как правило это либо чувствительные к скачку напряжения газонаполненные разрядники (surge protection device - SPD), либо четвертьволновые режекторы. Необходимо помнить, что любое из этих устройств пропускает часть энергии к оборудованию.

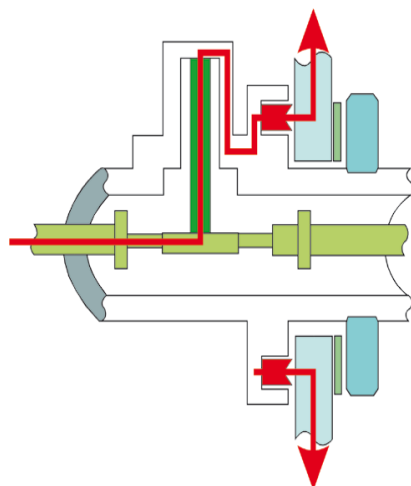


Конструктивно SPD включает в себя два электрода, разделенные небольшой керамической трубкой с газом. Порог срабатывания зависит от свойств газа, его давления и величины зазора между электродами.



При попадании броска напряжения на вход устройства внутри колбы происходит зажигание газа, и проводимость канала резко возрастает. В этот момент напряжение на разряднике составляет 700 — 900В. Далее с ростом выравнивающего тока оно падает до 10 — 20В. После спада волны дуга в разряднике гаснет, и устройство переходит в исходное высокоомное состояние.

Газонаполненные разрядники могут использоваться на частотах до 2.5ГГц. Верхняя граница диапазона диктуется емкостными характеристиками капсулы.



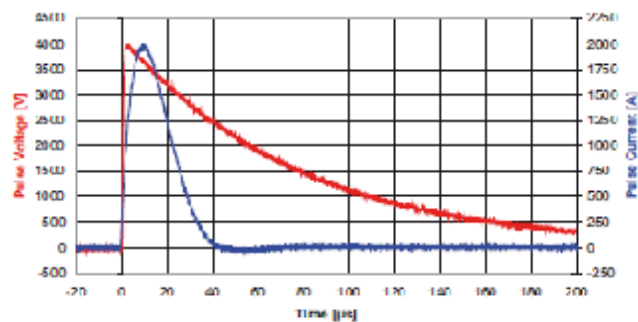
Технология устройств защиты от грозовых разрядов с применением четвертьволнового шлейфа основана на трансформации сопротивления  $\lambda/4$  линии. Короткозамкнутый на конце шлейф имеет длину соответствующую середине рабочего диапазона и образует полосопропускающий фильтр. Диапазон настройки лежит в пределах 50% от значения центральной частоты.

Поскольку энергетический спектр грозового разряда располагается в низкочастотной области, вся энергия уходит по отводу от центрального проводника на землю. С сигналом рабочей частоты происходит следующее. Попадая на вход устройства, он по мере прохождения шлейфа до места короткого замыкания набирает фазовый сдвиг 90. Здесь волна отражается со скачкообразным изменением фазы на 180 и возвращается ко входу шлейфа. В результате отраженный сигнал возвращается в фазе с прямым.

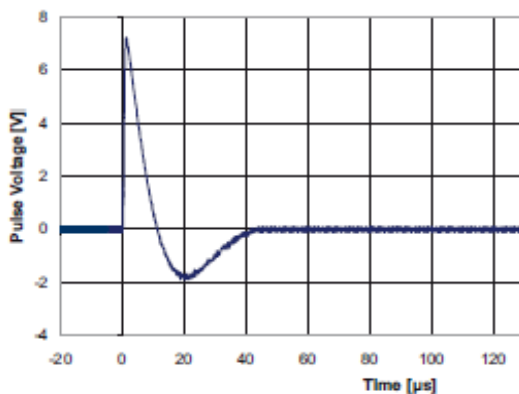
Стандартное устройство защиты с четвертьволновым шлейфом имеет более узкий рабочий диапазон по сравнению с газонаполненным, однако пропускает остаточный импульс значительно меньшего уровня (6В положительный пик и - 2В - отрицательный) и способен работать с большими мощностями. Такие разрядники находят применение до частот порядка 20ГГц. Они имеют лучшие интермодуляционные характеристики, не требуют обслуживания.

К недостаткам можно отнести отсутствие возможности передачи постоянного напряжения по фидеру.

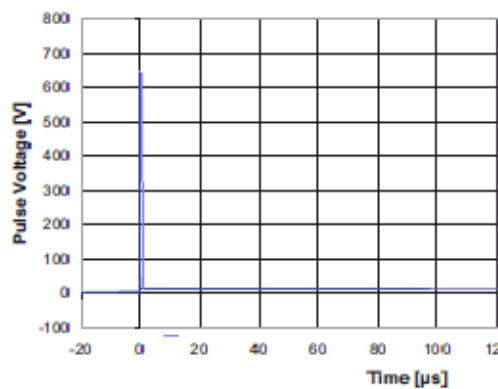
Сравнить особенности характеристик обоих типов устройств можно по приведенным ниже рисункам, представленным в одной временной развертке. Слева представлен реальный остаточный импульс для четвертьволнового устройства, справа — газонаполненного разрядника.



Входной импульс



Остаточный импульс -  
λ/4 протектор



Остаточный импульс -  
разрядник

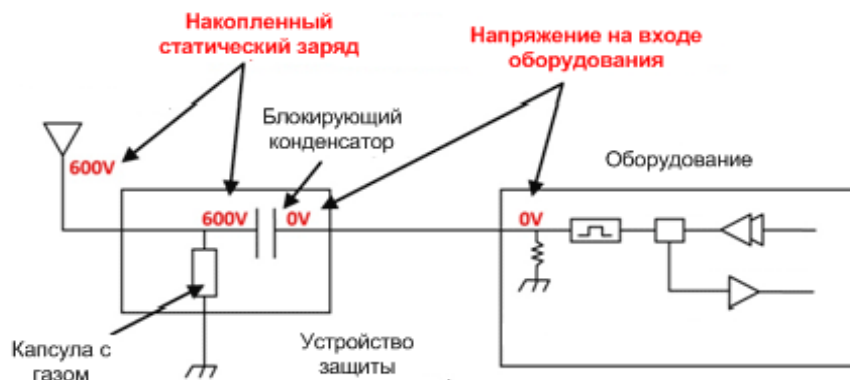
К сожалению остаточный импульс от обоих устройств защиты способен вывести терминальное оборудование из строя. Высокий уровень скачка напряжения на выходе газонаполненного разрядника способен вызвать дуговые разряды и разрушение входных емкостных цепей или значительный уровень тока в шунтовых элементах. Остаточное напряжение в четвертьволновых устройствах может значительно возрасти при возникновении «звона» в антенне на частотах выше частоты настройки шлейфа. В этом случае короткозамкнутый шлейф имеет индуктивный характер сопротивления. Появление такой нагрузки, как мы уже выяснили, приводит к негативным процессам, происходящим в линии.

Для уменьшения влияния остаточного импульса производители устройств грозозащиты рекомендуют применять изделия с блокировкой постоянного тока (DC blocking). PolyPhaser представляет такие характеристики своего устройства (Impulse suppressor): при том же входном импульсе остаточный после прохождения скачок напряжения составляет 0.5В амплитуды длительностью 10нсек.

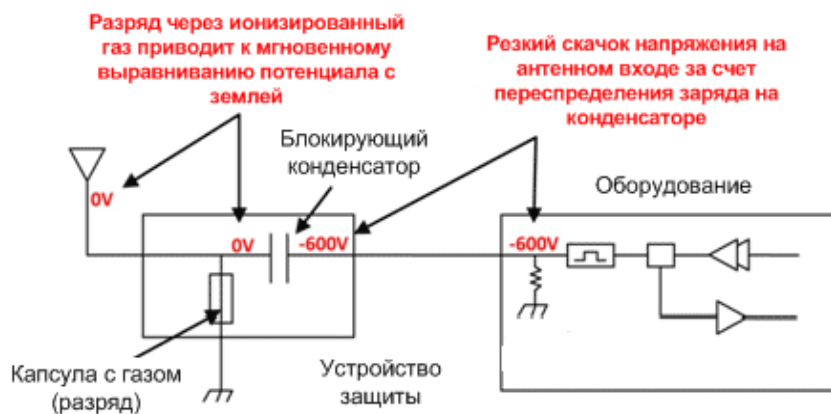
Выбор типа супрессора требует внимательности. Рассмотрим случай применения штыревой

незаземленной антенны и газонаполненного разрядника с блокировкой по постоянному току типа Polyphiser IS-B50.

Как известно, на такой антенне постепенно накапливается статический заряд, вызванный обтеканием воздуха ее поверхности, различными осадками и другими причинами. По мере увеличения заряда он оказывается на обкладке блокирующего конденсатора.



Как только напряжение на центральном проводнике становится выше напряжения пробоя капсулы, происходит разряд, и прилегающая обкладка блокирующего конденсатора оказывается с нулевым потенциалом. Поскольку напряжение на конденсаторе не может измениться скачком, его разряд произойдет через входные цепи оборудования.



Для защиты от такого эффекта в некоторых моделях разрядников устанавливают дроссель для стекания статического заряда. К сожалению, такое решение в недорогих устройствах имеет ряд недостатков. Образованная реактивность вносит дополнительные потери в тракт передачи, создает нежелательные резонансы. Кроме того, поскольку катушка намотана на ферритовом сердечнике, во время удара молнии сильное магнитное поле ориентирует домены феррита так, что индуктивность катушки меняется. Это ухудшает пропускную способность устройства. При этом каждый последующий разряд приводит к растущей деградации магнитных свойств сердечника.

Поэтому лучше использовать изделия с катушками, не имеющими сердечника. Другое решение проблемы — применение антенн, с заземленным по постоянному току активным

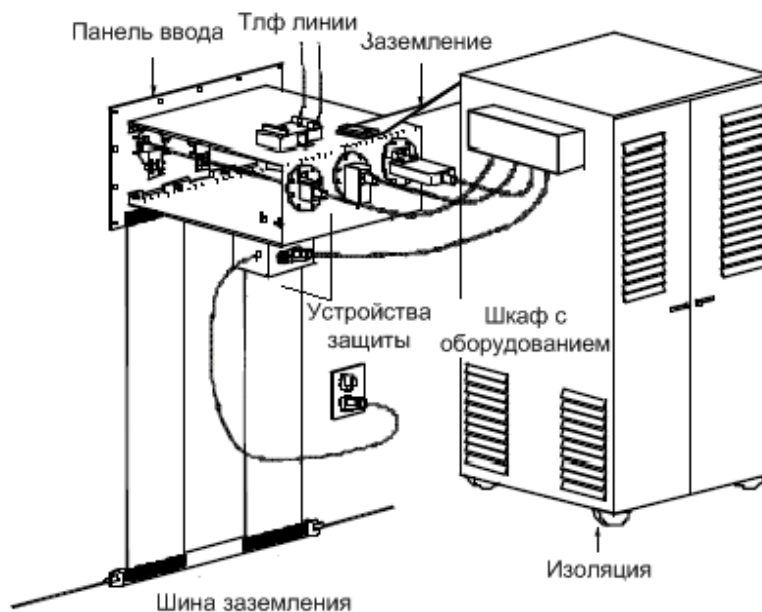
элементом. Проверить на замыкание можно просто измерив сопротивление между центральной жилой и экраном кабеля, подключенного к ее разъему.

Еще один случай некорректного использования оборудования изображен на следующем рисунке. Здесь уже применен разрядник типа Diamond SP3000 (DC – 3000МГц), который последовательно включен с объемным резонатором. Петля связи для возбуждения резонатора соединена с землей по постоянному току. Поэтому условий для зажигания разрядника может не возникнуть и вся энергия всплеска пройдет через петлю резонатора.



В ходе прохождения тока по петле возникающие сильные магнитные поля способны деформировать ее, расстраивая резонатор. Есть опасность образования дуговых разрядов внутри объема и образования спаек в разъеме, которые не позволят извлечь кабель.

Установка устройств грозозащиты должна производиться в точке ввода кабеля в помещение. В этом случае соблюдается правило: все оборудование, подлежащее заземлению, должно иметь одну точку подключения к шине. Это касается защитных устройств всех линейных окончатий — радиочастотных трактов, телефонных линий, силовых кабелей. Шкаф с оборудованием должен соединяться с этой точкой посредством металлической ленты с низкой индуктивностью. Если шкаф подключить к заземлению в другом месте, параллельная цепь может предоставить дополнительный путь для тока разряда через оборудование.



Особое внимание стоит обратить на тот факт, что с ростом количества различных соединителей возникает проблема возникновения продуктов интермодуляции в местах подключения пассивных элементов и металлических контактов. При прохождении сигналов разных частот через нелинейный элемент в тракте появляются дополнительные составляющие суммарного сигнала, которые невозможно отфильтровать. Системы с особыми требованиями по чувствительности к приемному оборудованию могут столкнуться с большой проблемой при несоблюдении мер по уменьшению уровня интермодуляционных продуктов. Кроме того эти продукты могут негативно влять на условия удовлетворения требованиям ограничения максимального уровня сигнала для устройств цифровой модуляции.

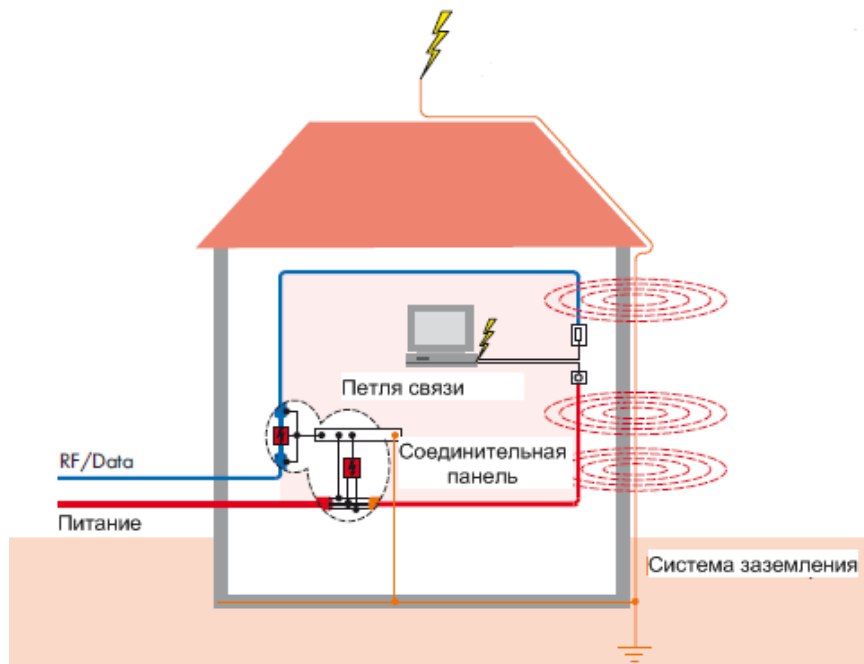
Для уменьшения влияния продуктов интермодуляции на работу сайта необходимо соблюдать следующие требования: избегать применения меди и ее сплавов; отдавать предпочтение изделиям с контактной поверхностью, покрытой серебром или белой бронзой с толщиной покрытия не менее 6 мкм; не использовать изделия из нержавеющей стали, никеля и ферритов в тракте передачи; соблюдать требования по установке разъемов и монтажу контактных панелей. Центральный проводник разъема предпочтительно запаивать. Из всех типов соединителей лучше выбирать разъемы типа N.

Не нужно забывать, устройства грозозащиты тоже требуют минимального обслуживания. Для четвертьволновых протекторов оно заключается в наблюдении за состоянием разъемов, которые могут быть повреждены в результате превышающей допустимой по спецификации величины тока разряда. Изъяз в коннекторе приводит к росту отраженной энергии, который может быть зафиксирован рефлектометром.

Повреждение газонаполненного разрядника также может быть вызвано сильным разрядом. В результате перегрузки внутри конструкции возникает спайка центрального проводника с экраном. Эта неисправность носит более выраженный характер, и обнаруживается фактически сразу.

Как показывает практика, пострадавшие устройства защиты являются признаком повреждения и других элементов системы. Поэтому в таких случаях необходимо провести полную ревизию оборудования на предмет неисправностей.

После того как все работы по защите оборудования проведены, остаются вопросы, касающиеся дополнительных мер по обеспечению высокой работоспособности системы. Большой силы ток, наведенный в кабеле, проходит внутри здания с оборудованием, стоящем как правило в непосредственной близости от мачтовых сооружений из-за требований минимизации длины передающей линии. Магнитное поле, образуемое стекающим разрядом, может наводить высокое напряжение в окружающих проводниках, достигающее сотен киловольт. Даже одиночный коаксиальный кабель может служить таким источником поля при недалеком разряде молнии.



Наведенное напряжение вычисляется по формуле  $U = -M \frac{di}{dt}$ . Индуктивность  $M$  петли зависит от ее размера и от расстояния до проводящего канала. Кольцо с длиной проводника 40м на расстоянии 10м дает  $M$  около 1.5мГ. При уменьшении расстояния до 1м величина взаимной индукции возрастает до 5мГ. Таким образом при разряде 20кА/мкс наведется напряжение 100кВ.

Чтобы свести к минимуму возможность поражения оборудования таким импульсом применяют экранированные контейнеры с металлической обшивкой. Это позволяет защититься от проникновения электромагнитных волн и магнитного поля. Если помещение не имеет экранирующих свойств, то проводку размещают в металлических каналах. Все провода должны иметь минимальную длину. Далее, поскольку интенсивность поля уменьшается пропорционально квадрату расстояния, воздействие магнитного импульса может быть сведено к минимуму размещением мачтовой конструкции на удалении от здания.

Получающаяся в этом случае большая длина кабеля вносит дополнительный вклад в индуктивную составляющую отвода. В связи с этим возрастает ток, протекающий по мачте в землю. Эта часть кабеля не будет восприимчива к действию магнитного поля, поскольку его направление оказывается перпендикулярным по отношению к силовым линиям поля.

Конечно, вопрос защиты телекоммуникационного оборудования от последствий грозового разряда гораздо шире, чем рассмотрено здесь. Главное, что нужно помнить, - нельзя предотвратить попадания молнии в конструкцию башни, но необходимо, чтобы процесс прохождения разряда был контролируемым.

### Полезная литература:

1. 53908024-Lightning-Protection-Grounding-for-Communication-Sites.pdf
2. Application\_notes.pdf
3. LP\_catalogue.pdf
4. HARGER LIGHTNING PROTECTION 2008.pdf
5. Lightning Protection for Ham Radio.pdf

