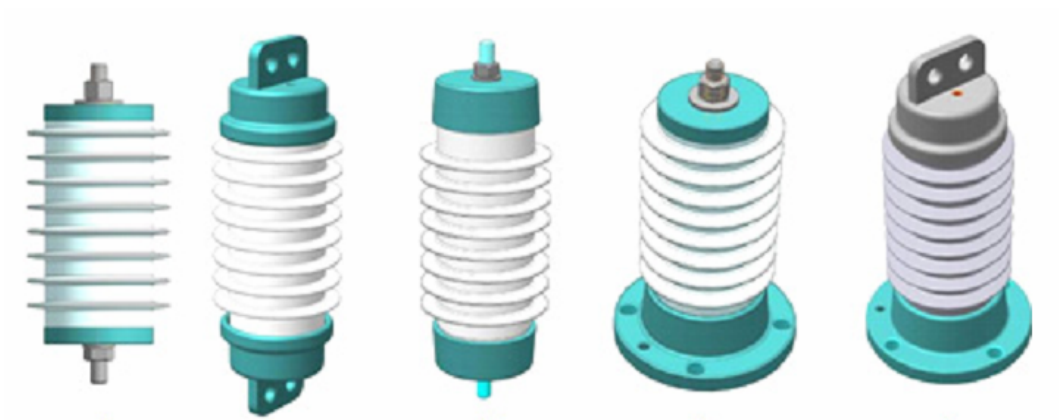


ВЫБОР И ПРИМЕНЕНИЕ ОПН В РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ СН



СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Кратковременные перенапряжения промышленной частоты	3
2. Металлоксидные ограничители перенапряжения среднего напряжения	
2.1. Конструкция ОПН	4
2.2. Принцип действия ОПН	4
2.3. Выбор параметров ОПН	5
3. Выбор ОПН	
3.1. Эффект воздействия временных перенапряжений на МО ОПН	5
3.2. Значение аттестационного напряжения U_r ОПН	6
3.3. Выбор ОПН и определение рабочего напряжения U_c	6
3.4. Примеры и частные случаи	7
4. Защита	
4.1. Уровень защиты ОПН	9
4.2. Защитная зона ОПН	9
5. Специальные применения ОПН	
5.1. Защита от перенапряжений секций кабеля при переходе воздушной ЛЭП в кабельную	11
5.2. Трансформатор в конце кабеля	12
5.3. Трансформатор непосредственно подключен к воздушной ЛЭП, подверженной грозovým перенапряжениям только с одной стороны	13
5.4. ОПН в закрытых элегазовых распредустройствах среднего напряжения ..	14
5.5. Генератор присоединен к линии среднего напряжения, подверженной грозovým перенапряжениям	14
5.6. Защита двигателей от перенапряжений	14
5.7. Защита кабельной оболочки высоковольтных кабелей	15
5.8. Металлоксидные ОПН для сети постоянного тока	15

Введение.

Оборудование электрических сетей подвергается многим опасным воздействиям. Одна из главных опасностей - перенапряжение. Высокая стоимость электрооборудования не позволяет проектировать его с изоляцией, которая выдержала бы любые перенапряжения. По своей природе эта опасность не может быть устранена полностью, но ее можно уменьшить. По этой причине, подход к решению проблемы состоит в том, чтобы встраивать защитные устройства в сеть. Этот метод оказался наиболее рентабельным и надежным. Метод применяется в сетях высокого, среднего напряжения, а также в сетях напряжением до 1 кВ.

Наибольшую опасность для оборудования представляют импульсные перенапряжения. Они возникают вследствие атмосферных разрядов и коммутаций в сети. Использование ограничителей перенапряжения (ОПН) является наиболее эффективной защитой от этих перенапряжений. ОПН устанавливается в непосредственной близости от защищаемого оборудования, и действует как шунт для импульса перенапряжения.

Величина перенапряжения обычно определяется в условных единицах «р.и.». Эта единица определяется как

$$1 \text{ р.и.} = \sqrt{2} \cdot U_m / \sqrt{3}$$

где U_m - максимальное действующее значение линейного напряжения при нормальном режиме работы сети. Фактическое напряжение сети обычно меньше, чем U_m .

Таблица 1: Значение 1р.и. для различных значений U_m

U_m (кВ)	3.6	7.2	12	17.5	24	36	42
1 р.и. (кВ)	2.9	5.9	9.8	14.3	19.6	29.4	34.3

В дополнение к импульсным перенапряжениям, электрические сети также испытывают кратковременные перенапряжения. Как правило, это перенапряжения промышленной частоты, вызванные изменениями в режиме работы сети.

Таким образом, перенапряжения в сетях могут быть разделены на следующие категории:

1. Кратковременные перенапряжения промышленной частоты

Возникают, например, при отключении нагрузки или при коротком замыкании на землю. Их продолжительность может находиться в пределах от 0,1 секунды до нескольких часов. Обычно их амплитуда не превышает $V \sim 3$ р.и., так что они, как правило, не представляют угрозы для оборудования. Тем не менее, они являются критическим фактором для правильного выбора ОПН.

Ферромагнитный резонанс в трансформаторе может также привести к очень высоким перенапряжениям, в основном сетевой частоты. ОПН(ы) защищают изоляцию трансформатора от повреждений, вызванных такими резонансными явлениями. Однако сами ОПН при этом будут перегружены и могут выйти из строя вследствие перегрева. Современные трансформаторы с малыми потерями, подключаемые на ненагруженную кабельную линию, особенно часто вызывают ферромагнитный резонанс, который разрушает ОПН.

1. Коммутационные перенапряжения происходят во время переключений и представляют собой быстро затухающие колебания. Частота колебаний часто достигает нескольких кГц, а амплитуда может доходить до 3 р.и.

Крутые импульсы с более высокой амплитудой могут появиться при переключениях в сетях с большими индуктивными нагрузками. Здесь длительность фронта импульса перенапряжения находится в пределах от 0,1 до 10 мкс, а амплитуда может достигать 4 р.у.

Включение и отключение нагруженных кабельных или воздушных ЛЭП может также вызывать перенапряжения. Так как их амплитуда обычно ниже 2,2 р.у., то они не представляют опасности для сети. Однако, критические значения до 7 р.у. могут появиться, если разъединитель работает слишком медленно, и в этом случае может возникнуть повторное зажигание дуги между его контактами.

В самом широком смысле, коммутационные перенапряжения также включают импульсные перенапряжения, вызванные начальным моментом замыканий на землю или между фазами, при этом амплитуды обычно имеют небольшие значения. С другой стороны, если они происходят через малые промежутки времени (перемежающиеся замыкания на землю), то их частое повторяющееся воздействие может привести к разрушению ОПН вследствие перегрева.

2. Грозовые перенапряжения возникают вследствие атмосферных разрядов. Прямой удар молнии вызывает особенно мощные перенапряжения с амплитудой до нескольких Мегавольт. Как правило, эти мощные импульсы не достигают оборудования, потому что изоляторы, установленные на ЛЭП перекроются дугой, обеспечивая тем самым естественную защиту от перенапряжений. В сети среднего напряжения амплитуда, остающаяся после того, как такие изоляторы перекрываются, может достигать значения до 10 р.у.

Удар молнии в защитный трос ЛЭП также вызывает перенапряжения в проводах. Эти наведенные перенапряжения достигают амплитудных значений через несколько микросекунд и затем быстро затухают. При этом, амплитудные значения в сетях среднего напряжения достигают 10 р.у. Грозовые перенапряжения представляют самую большую угрозу для сетей среднего напряжения. Защита должна быть построена таким образом, чтобы ограничить перенапряжения до безопасных для электрооборудования величин. В то же время выход из строя ОПН, например от перегрузки, должен вызывать минимум неизбежных при этом повреждений.

2. Металлоксидные ограничители перенапряжения среднего напряжения.

Почти все новые высоковольтные сети, смонтированные за последние 15 лет, оборудованы металлоксидными ОПН. Напротив, в сетях среднего напряжения, все еще устанавливаются обычные вентильные разрядники. В последнее время металлоксидные ОПН без искровых промежутков получили широкое распространение и в этих сетях. Эта замена оправдала себя в так же как и высоковольтных сетях, благодаря лучшему уровню защиты, особенно при импульсах перенапряжений с очень крутым фронтом и лучшими характеристиками в условиях загрязненной окружающей среды. Переход к полимерному корпусу сделал возможным изготовление ОПН без необходимых ранее искровых промежутков. Полимерные корпуса также имеют другие важные преимущества. Это - высокая надежность (герметизация от проникновения влаги!) и существенное снижение риска разрушающего воздействия в случае выхода ОПН из строя (осколочное разрушение корпуса).

2.1. Конструкция ОПН

МО ОПН состоит только из двух элементов. Один из них - активная часть, состоящая из одного или более обычно цилиндрических металлоксидных дисков (резисторные блоки). Второй - изоляционный корпус из полимерного материала. Механическая прочность ОПН обеспечивается либо за счет корпуса (например, фарфорового), или, в случае полимерного корпуса, за счет внутренней активной части. В последнем случае волокно-армированная структура либо полностью охватывает резисторный блок, либо жестко стягивает его по концам. Резисторы смонтированы в цилиндре с волокно-усиленной структурой, что делает конструкцию более прочной и жесткой. Простая и механически надежная конструкция активной части, пониженная вероятность разрушения при повреждении ОПН, делает возможным использование некоторых ОПН с полимерным корпусом в качестве опорных изоляторов в определенных условиях.

2.2. Принцип действия ОПН

ОПН ограничивает напряжение, прикладываемое к его зажимам, формируя делитель напряжения вместе с полным сопротивлением источника перенапряжения или с волновым сопротивлением питающей линии. Сопротивление ОПН нелинейно, поэтому при превышении некоторого предела небольшие изменения напряжения на зажимах ОПН приводят к стремительному росту тока через резисторы. Чем больше нелинейность, тем более узкий диапазон остающегося напряжения ОПН.

Поскольку МО ОПН не имеют искровых промежутков, и их нелинейность настолько велика, что при нормальных эксплуатационных режимах ток, протекающий через резисторы, очень мал и ОПН постоянно находится в рабочем состоянии и срабатывает фактически без задержки (рис.1). Другими словами, отсутствует задержка в срабатывании, как это имеет место в разрядниках с искровыми промежутками, где пробивное перенапряжение промежутков должно быть сначала превышено. Это означает, что металлооксидные ОПН имеют два существенных преимущества. Во-первых, МО ОПН надежно ограничивает напряжение до безопасных значений даже для крутых импульсов и даже в самом начале импульса перенапряжения. Во-вторых, не существует никакого другого пути, по которому импульсы перенапряжения смогут "обходить" ОПН.

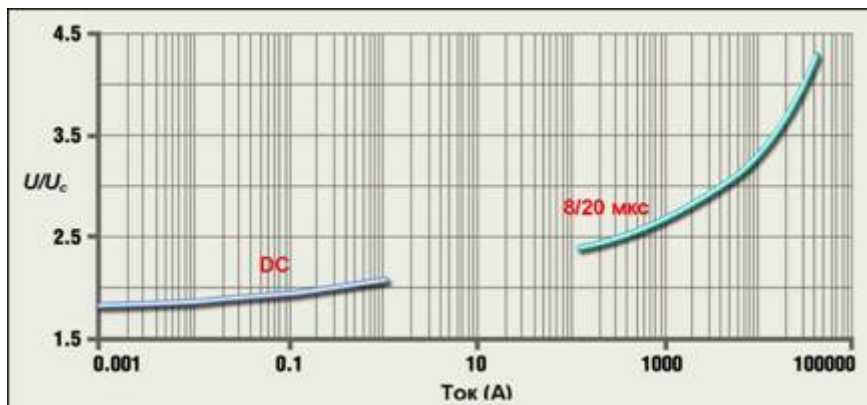


Рис. 1: Типичная вольт-амперная характеристика МО ОПН на 10 кВ, Класс 1.

Когда перенапряжение спадает, ток в резисторах уменьшается в соответствии с характеристикой блока МО, а сопровождающий ток, характерный для разрядников с искровыми промежутками, в ОПН не возникает. Это особенно важно в системах постоянного тока, потому что отсутствует необходимость в прохождении тока через нуль для естественного гашения дуги, возникающей в искровых промежутках разрядников. Поэтому МО ОПН могут использоваться, как в сетях с частотой 50/60 Гц и 16 2/3 Гц, так и в системах постоянного тока.

2.3 Выбор параметров ОПН

Выбор ОПН производится по двум главным параметрам. Один из них - рабочее напряжение U_c , при котором ОПН будет работать надежно и устойчиво много лет. Другой - способность поглощения разряда или номинальный разрядный ток I_n в соответствии с классом ЛЭП.

3. Выбор ОПН

3.1. Эффект воздействия временных перенапряжений на МО ОПН

Поскольку ОПН не имеют искровых промежутков, блоки резисторов в них подвергаются постоянному воздействию напряжения сети. В нормальных эксплуатационных условиях на емкостной ток накладывается очень небольшая активная составляющая несинусоидальной формы. Эта активная составляющая создает потери в ОПН, так что в итоге температура ОПН незначительно повышается относительно температуры окружающего воздуха.

Когда напряжение повышается, ток в резисторах и потери быстро растут. Однако, благодаря своей массе, ОПН не разрушается мгновенно, а только нагревается до определенной степени. Если перенапряжение кратковременно, ОПН не будет поврежден. На рис. 2 показаны характеристики устойчивости ОПН в зависимости от длительности воздействия перенапряжения. Нижняя кривая характерна для ОПН, которые уже предварительно нагружены мощными импульсами в дополнение к чистому перенапряжению с UTOV (в случае ОПН на 5 кВ и 10 кВ Класс 1 с мощным импульсом 4/10 мкс и амплитудой 65 кВ или 100 кВ). Вторая, верхняя кривая, показывает случай, где на ОПН воздействует только импульс перенапряжения.

Значения на характеристиках подаются либо в абсолютных единицах, либо же по отношению к рабочему напряжению ОПН U_c .

Следующий пример объясняет использование диаграммы: ОПН 10 кВ, Класс 1 с U_c 6 кВ работает с напряжением 6 кВ на его зажимах в течение неопределенно отрезка времени. В момент $t = 0$ происходит разряд, и через ОПН проходит импульс тока 100 кА формой 4/10 мкс. Сразу после разряда происходит замыкание на землю одной фазы, на неповрежденных фазах напряжение возросло приблизительно до 7.7 кВ ($T = 7.7/6.0 \approx 1.28$). Релейная защита сети имеет выдержку

времени срабатывания около 3 с. Диаграмма показывает, что ОПН выдержит этот импульс перенапряжения. Задержка времени более 3 с привела бы к тому, что рабочая точка находилась бы выше более низкой кривой, что могло бы привести к термическому разрушению ОПН.

$$(T = \frac{U_{TOV, \max}}{U_c})$$

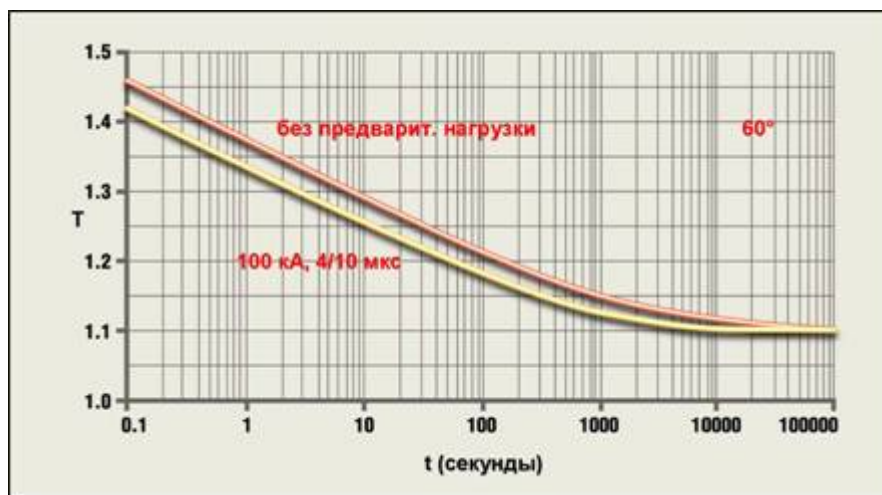


Рис. 2: Характеристики устойчивости ОПН в зависимости от длительности воздействия импульса перенапряжения, TOV диаграмма,

3.2. Значение аттестационного напряжения U_g ОПН

Аттестационное напряжение U_g не имеет никакого специфического практического значения для пользователя, потому что его значение зависит от испытательных условий, определяемых согласно МЭК 60099-4. Аттестационное напряжение служит просто вспомогательной величиной для определения рабочих характеристик.

3.3. Выбор ОПН и определение рабочего напряжения U_c

Первая величина, необходимая для выбора напряжения U_c ОПН - напряжение, прикладываемое к зажимам ОПН в нормальных, неаварийных условиях. Это зависит от того, подключен ли ОПН между фазой и землей, между фазами ЛЭП или между нейтралью и землей. Обычно, напряжение может быть рассчитано исходя из максимального межфазного (линейного) напряжения системы. Если это напряжение неизвестно, или оно меняется со временем, для вычислений берется самое высокое напряжение для оборудования U_m .

В трехфазных системах, временные перенапряжения могут происходить после замыканий на землю, и величина их определяется условиями заземления нейтрали. Продолжительность перенапряжения зависит от условий работы сети. Глухозаземленные сети обычно выключаются в течение нескольких секунд. Изолированные и сети с компенсацией могут продолжать работать при условиях замыкания на землю в течение нескольких часов. Величина ожидаемого временного перенапряжения часто определяется с использованием фактора E . Временное перенапряжение U_{TOV} тогда рассчитывается как:

$$U_{TOV} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \cdot E$$

где U_m может быть заменено напряжением системы U_s , если эта величина известна.

Чтобы МО ОПН работал в сети надежно, при выборе рабочего напряжения U_c должны быть выполнены два условия:

- U_c должно быть больше или равняться напряжению, прикладываемому к зажимам ОПН. Для ОПН, связанных с землей, должно выполняться следующее условие:

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

где U_m может быть заменено напряжением системы U_s .

- Точка устойчивости ОПН, подвергнутого временным перенапряжениям, должна лежать ниже или на характеристической кривой перенапряжений. С целью проверки, также должна быть определена максимальная продолжительность перенапряжения. В целях повышения надежности всегда используют более низкую из двух кривых, если не имеется особых причин для иного решения. Если рабочая точка лежит выше кривой, рассматриваемый ОПН не может использоваться в данной сети. Вместо этого должен использоваться ОПН с более высоким рабочим напряжением.

$$U_c \geq \frac{U_{TOV}}{T}$$

где T определяется временем отключения короткого замыкания системы t и характеристикой устойчивости ОПН к перенапряжениям.

3.4. Примеры и частные случаи.

3.4.1. Сети с компенсацией емкостного тока замыкания на землю или с заземлением нейтрали через большое сопротивление

$$U_c \geq U_m$$

В этих сетях напряжение «фаза-земля» на неповрежденных фазах в основном не будет превышать U_m . для ОПН, подключенных между фазой и землей
Максимальное напряжение на нейтрали трансформатора достигает значения $U_m/\sqrt{3}$:

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

для ОПН, установленных между нейтралью трансформатора и землей
Необходимо отметить, что при некоторых обстоятельствах в результате резонансных явлений фактор E может достигать величины 1.85. В таких случаях рабочее напряжение U_c должно быть увеличено соответственно.

3.4.2. Сети с заземлением нейтрали через большое сопротивление и с релейной защитой от замыканий на землю.

$$U_c \geq \frac{U_m}{T}$$

для ОПН, подключенных между фазой и землей

$$U_c \geq \frac{U_m}{T \cdot \sqrt{3}}$$

для ОПН, подключенных между нейтралью трансформатора и землей

Амплитуда перенапряжений достигает тех же значений, что и в сетях с компенсацией емкостного тока. Быстрое отключение, однако, может позволить использовать ОПН с более низким рабочим напряжением U_c при более надежном уровне защиты от перенапряжений.

3.4.3. Сети с низким сопротивлением заземления нейтрали $E < 1.4$

Если большое количество трансформаторов имеют заземленные нейтрали с низким сопротивлением, фактор замыкания не будет превышать величины 1.4 для всей сети. Из-за большого значения тока короткого замыкания, проведение расчетов в таких сетях упрощается. Можно использовать ОПН с более низким рабочим напряжением U_c и при этом обеспечить лучший уровень защиты от перенапряжений.

$$U_c \geq \frac{1,4 \cdot U_m}{T \cdot \sqrt{3}}$$

для ОПН между фазой и землей
Максимальное напряжение в нейтрали незаземленных трансформаторов

$$U_{TOV} = 0,4 \cdot U_m$$

$$U_c \geq \frac{0,4 \cdot U_m}{T}$$

для ОПН, подключенных между нейтралью трансформатора и землей.

3.4.4. Сети с низким сопротивлением заземления нейтрали $E > 1.4$

Если нейтрали трансформаторов заземлены через сопротивление с целью ограничения токов короткого замыкания, напряжение на неповрежденных фазах повышается до U_m . В случае активного значения сопротивления заземления напряжение U_m может даже увеличиться на 5 %.

$$U_c \geq \frac{1,05 \cdot U_m}{T}$$

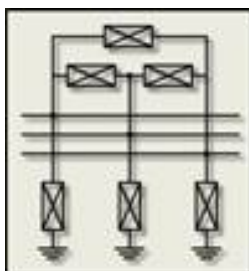
для активного сопротивления заземления.

3.4.5. ОПН, подключенные между фазами (схема Neptune).

В некоторых схемах, например, трансформаторы для дуговых печей, защита от коммутационных перенапряжений только с помощью ОПН, подключенных между фазами и землей, не может быть достаточной. В этих случаях уровень защиты может быть улучшен за счет установки дополнительных ОПН между фазами.

Защита состоит из 6 ОПН, 3 - между фазами и 3 - между фазами и землей:

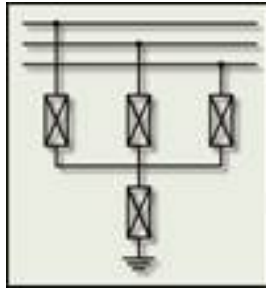
$$U_c \geq U_m$$



для всех ОПН

Разновидностью такой конфигурации является схема Neptune, названная так из-за своего вида. Эта схема также обеспечивает защиту и между фазами, и по отношению к земле. Уровень защиты по указанной схеме на 33 % выше, чем у варианта с 6 ОПН. Более высокий уровень защиты объясняется тем, что необходимо подбирать ОПН с более высоким рабочим напряжением U_c .

$$U_c \geq 0,667 \cdot U_m$$



для всех ОПН

3.4.6. Напряжение сети содержит высшие гармоники.

Из-за нелинейной U-I характеристики, критическое значение для МО ОПН - амплитудное значение рабочего напряжения. Если же напряжение содержит высшие гармоники, необходимо учитывать, что амплитудное значение напряжения может отклоняться весьма существенно от увеличенного в $\sqrt{2}$ раз действующего значения напряжения сети. Если это различие составляет менее, чем 5 %, величина рабочего напряжения должна быть изменена соответственно. Для больших отклонений, ОПН должен быть выбран после консультации с его изготовителем.

То же самое рекомендуется при монтаже МО ОПН вблизи тиристорных преобразователей. Коммутационные пики, наличие постоянной составляющей напряжения указывают на то, что необходимо принимать во внимание дополнительные критерии выбора ОПН.

4. Защита

4.1. Уровень защиты ОПН

Уровень защиты U_{res} определяется как максимальное остающееся напряжение на зажимах разрядника, когда номинальный разрядный ток с формой 8/20 мкс проходит через ОПН. Большинство ОПН, установленных в сетях среднего напряжения имеет номинальный разрядный ток 5 кА или 10 кА. Форма номинального разрядного тока определяется как 8/20 мкс. Такой импульс перенапряжения характерен для грозовых перенапряжений. В технических характеристиках ОПН обычно указывается остающееся напряжение для токовых импульсов молнии и для значений, кратных номинальному разрядному току.

Коммутационные перенапряжения имеют более низкие амплитуды, чем перенапряжения молнии. Именно поэтому должны рассматриваться максимальные остаточные напряжения для коммутационных импульсов с формой 30/60 мкс и при амплитуде волны тока 125 и 500 А.

4.2. Защитная зона ОПН.

Импульсы перенапряжения в воздушных сетях и кабелях имеют форму бегущих волн. Это означает, что напряжения в проводнике в любое данное время зависят не только от времени, но также и от положения точки на проводнике, где производится измерение. Разности потенциалов могут быть очень большие, особенно возле мест, где происходит изменение полного сопротивления проводника (в точке перехода ЛЭП или же в точке разветвления). Причина этого - отражение волны в этих так называемых точках отражения. Необходимо учитывать, что напряжение на защищаемом оборудовании не всегда соответствует напряжению на ОПН в один и тот же момент времени. Чем дальше ОПН от оборудования, тем больше будет эта разница. При определенном расстоянии, может случиться, что ОПН вообще не обеспечивает защиту оборудования. Это критическое расстояние называется защитной зоной ОПН. ОПН должен всегда монтироваться так, чтобы электрическое расстояние между оборудованием и разрядником было меньше, чем защитная зона.

В системе среднего напряжения защитная зона L ОПН может быть приближенно оценена следующей формулой:

$$L = \frac{v}{2 \cdot S} \cdot \left[\frac{BIL}{1,2} - U_p \right]$$

Где $v = 300$ м/мкс (скорость света);

BIL = основной уровень импульсной прочности изоляции

оборудования, которое будет защищено; U_p = уровень ограничения перенапряжений защит разрядника (остаточное напряжение при номинальном токе разряда); S = крутизна импульса

перенапряжения.

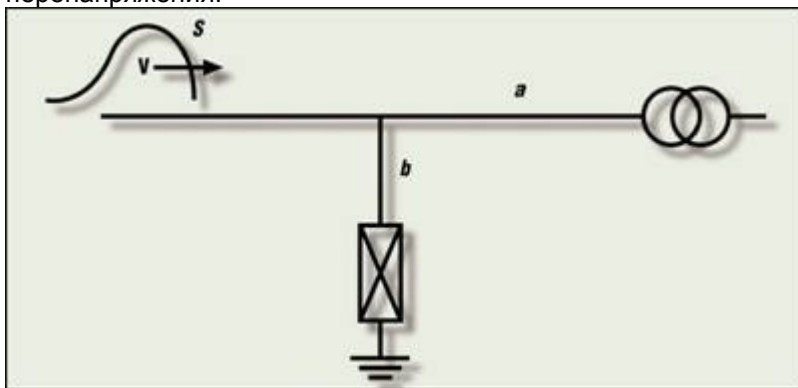


Рис. 3: Схема установки ОПН.

В упрощенной схеме на рис. 3, сумма расстояний a и b не должна превышать защитную зону L : Типичные значения S - 1550 кВ / р с (для воздушной сети на деревянных опорах) и 800 кВ / р с (воздушная сеть с заземленными траверсами). Для сетей среднего напряжения эти величины определяют приблизительно следующие защитные зоны:

$$L = 2,3 \text{ м}$$

Воздушная сеть с деревянными опорами

$$L = 4,5 \text{ м}$$

Воздушная сеть с заземленными траверсами

$$a + b \leq L$$

Вычисление предполагает, что длина заземляющего провода ОПН настолько коротка, что ее можно не учитывать. В противном случае, длину заземляющего проводника необходимо добавлять к расстоянию b .

Влияние трансформаторной емкости на защитную зону должно обязательно приниматься во внимание. Емкость может иногда приводить к недопустимому уменьшению защитной зоны L ; в зависимости от расстояния b , это уменьшение может составлять 80 % зоны. Это особенно важно для воздушной сети на деревянных опорах. Например, для системы напряжения 24 кВ, расстояние b должно быть не больше, чем 1 м. Защитная зона L составляет приблизительно 2 м, оставляя 1 м для расстояния a . При системе напряжений выше 24 кВ максимальная длина расстояния b составляет только 0,6 м.

Ясно, что защитный эффект ОПН критически зависит от его расположения на ЛЭП. Для максимальной защиты, ОПН должен быть установлен, как можно ближе к оборудованию, которое он защищает, а воздушная ЛЭП должна быть подключена непосредственно к ОПН. На рис. 4 показаны три варианта подключения ОПН для защиты трансформатора. Третий вариант - наилучший, хотя он тоже может быть улучшен за счет сокращения расстояния между трансформатором и ОПН. Первый вариант значительно хуже, потому что, а это очевидно, защитный эффект разрядника может быть существенно улучшен без больших дополнительных затрат.

В некоторых случаях довольно трудно, или даже невозможно, не превышать максимальное расстояние b 1 м. или 0.6 м. для воздушной ЛЭП на деревянных опорах. В таких ЛЭП необходимо изменить конструкцию. Как правило, это относится только к заземлению траверс последних 3 опор перед трансформатором. Это уменьшает крутизну перенапряжений до уровня, при котором защитная зона становится достаточной. Недостатком этого решения является то, что среднее количество замыканий на землю и коротких замыканий начинает расти, становясь почти таким же высоким, как в системах с заземленными траверсами. Другое, более изящное решение, состоит в том, чтобы установить второй комплект ОПН на последней опоре перед трансформатором, вместо дополнительных заземлений. Это также уменьшает крутизну волны перенапряжений, но без увеличения количества замыканий на землю или коротких замыканий

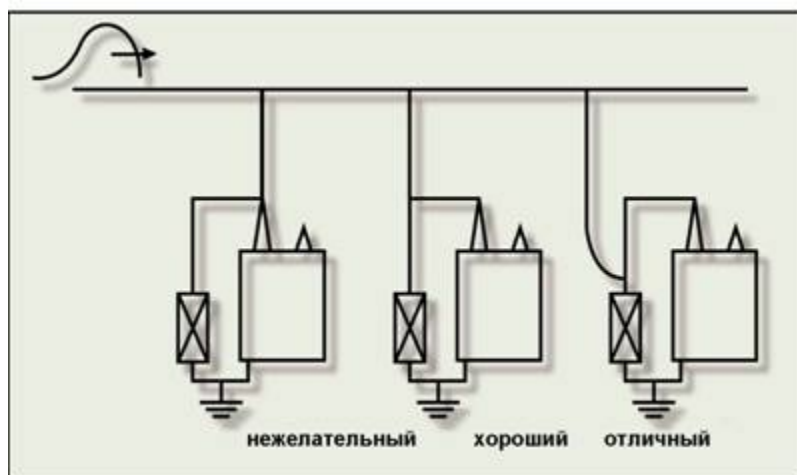


Рис. 4. Варианты подключения ОПН для защиты трансформатора

5. Специальные применения ОПН

5.1. Защита от перенапряжений секций кабеля при переходе воздушной ЛЭП в кабельную.

В большинстве случаев необходимо защищать оба конца секции кабеля с помощью ОПН. Для очень коротких секций достаточно защитить кабель только с одной стороны. Кабель, присоединяющий воздушную ЛЭП к подстанции, подвергается опасности перенапряжений только со стороны воздушной ЛЭП. Поэтому ОПН должны быть установлены в точке перехода воздушной ЛЭП в кабельную. Второй ОПН с другой стороны кабеля можно не устанавливать, если длина кабеля L_k не превышает значений, указанных в таблице 2.

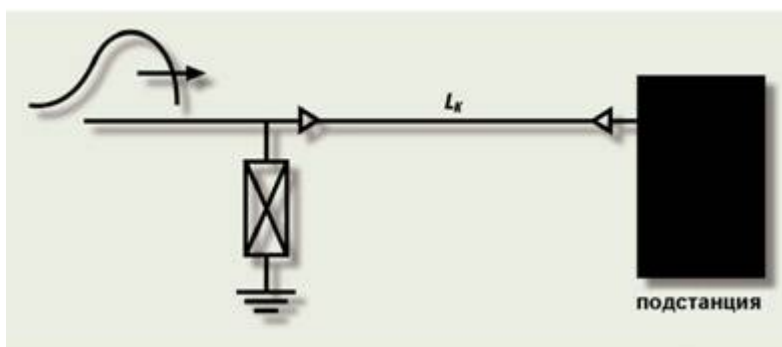


Рис. 5: Схема подключения воздушной ЛЭП к подстанции.

С другой стороны, оборудование внутри подстанции, подключенное к другому концу этого кабеля, может подвергаться перенапряжениям, вследствие отражения волны от конца кабеля. Это также может привести к необходимости установки ОПН на другом конце кабеля.

Таблица 2: Максимальная длина L_k кабеля между подстанцией и воздушной ЛЭП, при которой можно установить только один ОПН.

U, кВ / Z, Ом	L_k (м)			
	Деревянная опора		Заземленная траверса	
	30	60	30	60
3.6	x	x	x	x
7.2	64	45	64	50
12	40	30	40	32
17.5	25	21	26	22

24	28	23	28	24
36	22	20	22	20

Для оптимальной защиты концевых кабельных муфт и для ослабления бегущей волны, ОПН должны быть установлены непосредственно возле концевых кабельных муфт. Кабели, соединяющиеся с ОПН (включая проводник заземления!), должны быть, как можно короче для снижения возможного напряжения в петлях проводника. Кабельная оболочка или экран должны быть присоединены к заземлению ОПН.

Для кабелей, установленных между двумя секциями воздушной ЛЭП, часто достаточно установить ОПН только с одной стороны, хотя импульсы перенапряжения могут приходиться с обеих сторон. В этом случае защита, которую обеспечивает ОПН от перенапряжений, входящих с незащищенной стороны, существенно ослаблена. Поэтому, предлагаемая схема с одним ОПН рекомендуется только при очень коротких длинах кабеля.

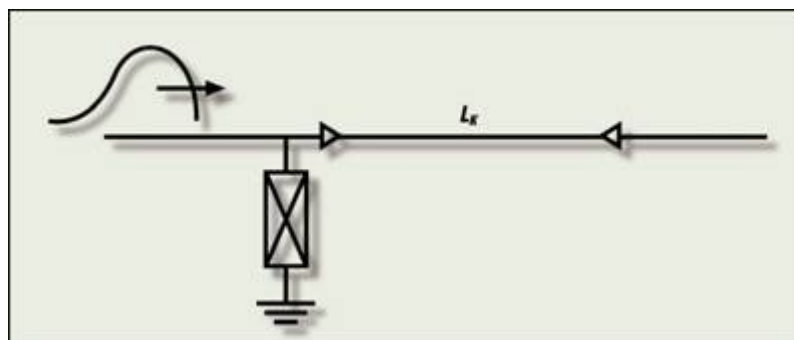


Рис. 6: Короткая кабельная вставка в воздушной сети.

Если кабель смонтирован, как часть воздушной ЛЭП на деревянных опорах (см. таблицу 3), защитная зона чрезвычайно мала. В этой схеме "естественная защита от перенапряжений" (см. выше) предлагаемая изоляторами в случае прямого удара молнии, очень ограничена. Значения для L_k , приведенные в таблице для ОПН, относятся к ОПН с номинальным током разряда $I_n = 10$ кА, при условии, что волновое сопротивление неизменно вдоль всей секции кабеля. Кабельные ответвления и другие точки отражения приводят к дальнейшему сокращению L_k .

Таблица 3: Максимальная длина L_k кабеля между двумя секциями воздушной ЛЭП с односторонней защитой (длина соединяющих проводников между ОПН и кабелем макс. 1 м)

U, кВ	Lk (m)			
	Деревянная опора		Заземленная траверса	
Z, Ом	30	60	30	60
3,6	7	3	17	10
7,2	9	4	22	13
12	9	4	19	14
17,5	6	3	15	13
24	10	5	17	15
36	8	4	15	14

5.2 Трансформатор в конце кабеля

Если длина L_k кабеля превышает значения, данные в таблицах, то необходим второй ОПН. Следующий вопрос, до какой степени второй А2 защитит понижающий трансформатор. Здесь решающее значение имеет расстояние между ОПН и трансформатором.

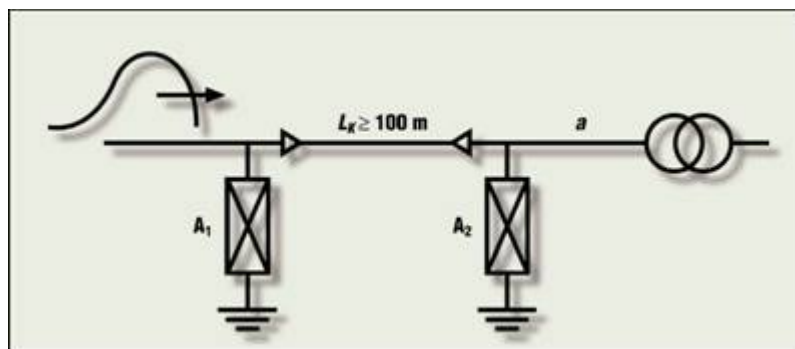


Рис. 7: Второй разрядник, установленный между кабелем и трансформатором.

В следующем примере, трансформатор подключен к воздушной ЛЭП, подверженной грозovým перенапряжениям, через кабель длиной L_K свыше 100 м. Как объяснено выше, ОПН необходим и в точке перехода воздушной ЛЭП в кабельную, и в конце кабеля. ОПН А1 служит, как защита для стороны проводника, ОПН А2 ограничивает перенапряжения, вызванные отражением в конце кабеля. ОПН связаны непосредственно с наконечниками кабеля.

Таблица 4: Максимально допустимое расстояние a между концом кабеля и трансформатором, когда второй ОПН установлен непосредственно в конце кабеля

U, кВ	a (m)			
	Деревянная опора		Заземленная траверса	
Z, Ом	30	60	30	60
3.6	300	300	500	500
7.2	43	37	53	53
12	20	14	20	14
17,5	17	10	16	10
24	19	12	19	12
36	16	11	20	11

В этой схеме, если расстояние a не превышает значений, приведенных в таблице 4, трансформатор будет достаточно защищен ОПН А2. Предполагается, что емкость трансформатора составляет 2 нФ. Меньшие значения емкости увеличивают максимально допустимое расстояние.

5.3. Трансформатор непосредственно подключен к воздушной ЛЭП, подверженной грозovým перенапряжениям только с одной стороны.

Вообще, только трансформатор, подключенный к воздушной ЛЭП, подверженной грозovým перенапряжениям, нуждается в установке ОПН для защиты от перенапряжений. Особый случай, когда высоковольтный трансформатор связывает высоковольтную сеть с сетью среднего напряжения, и при этом считается, что только высоковольтная сеть подвержена опасности грозových перенапряжений. При определенных обстоятельствах, также может потребоваться защита от перенапряжений и на стороне среднего напряжения.

Поскольку грозовые перенапряжения - очень быстрые процессы, приблизительно 40 % первоначальной амплитуды перенапряжения может емкостным путем перейти на сторону среднего напряжения через трансформатор. Для того, чтобы ограничить эту проблему, соответствующие инструкции рекомендуют на стороне среднего напряжения установить длинный кабель, низкоиндуктивный конденсатор, или рекомендуют комбинацию из эти двух способов. Альтернативное решение, использующее ОПН, имеет два явных преимущества:

1. Индуктивно переданные перенапряжения могут быть увеличены конденсаторами. Ограничение величины дополнительного напряжения требует тщательного подбора демпфирующего резистора. В решении, использующем ОПН без искровых промежутков, этот эффект даже не должен рассматриваться.
2. Пробой изоляции между первичной и вторичной обмотками трансформатора может привести к тому, что первичное напряжение попадет на сторону среднего напряжения и приведет к дополнительному повреждению оборудования. Если ОПН были установлены для

защиты стороны среднего напряжения, они могут быть разрушены, и вызовут короткое замыкание. Разрядник "жертвует" собой, чтобы защитить остальное оборудование, и повреждения будут ограничены только трансформатором. Поскольку разрядники фактически разработаны с учетом того, что они могут разрушаться в экстремальных условиях, последствия этой жертвы обычно менее серьезны, чем разрушение других устройств, таких, как конденсаторы.

Преимущества ОПН особенно очевидны в случае трансформатора, связывающего высоковольтную сеть с генератором.

Подобная ситуация справедлива и для трансформатора, соединяющего сеть среднего напряжения с низковольтной сетью. Здесь также грозовые перенапряжения емкостным путем могут передаваться от сети среднего напряжения на низковольтную сторону. Вот почему ОПН на низковольтной стороне рекомендуются даже в том случае, когда только сторона среднего напряжения подвержена опасности удара молнии.

Могут ли, и до какой степени, низковольтные ОПН защитить трансформатор от удара молнии на низковольтной стороне, является дискуссионным вопросом. Большинство специалистов считают, что эта защита является совершенно достаточной. Однако, снова и снова поступают сообщения о повреждении трансформаторов, которые не могут быть отнесены к грозовым перенапряжениям на стороне низкого напряжения. В этих случаях можно предположить, что эти, относительно медленные перенапряжения в виде переходных импульсов индуктивно передаются на сторону среднего напряжения трансформатора, при этом амплитуда их возрастает пропорционально коэффициенту трансформации до величины, при которой может пробиться изоляция трансформатора. В регионах с высокой грозовой активностью желательно установить разрядники с обеих сторон, даже, когда опасности грозовых перенапряжений подвержена только низковольтная сторона.

5.4. ОПН в закрытых элегазовых распределительных устройствах среднего напряжения.

Специальные ОПН внутренней установки монтируют непосредственно возле концевых кабельных муфт. Они обычно используются для защиты элегазовых распределительных подстанций среднего напряжения. Если ячейка подстанции связана с воздушной ЛЭП, подверженной опасности удара молнии, номинальный ток разряда этих ОПН должен быть 10 кА, Класс 1. Это условие должно соблюдаться даже, если 10 кА ОПН уже установлен в точке перехода между воздушной ЛЭП и кабелем. Если секция кабеля достаточно длинная, в подстанции можно установить ОПН на 5 кА, потому что ожидаемый остающийся ток разряда уменьшается с увеличением длины кабеля, и ОПН в точке перехода воздушной ЛЭП в кабельную будет брать большую часть тока разряда на себя.

Если ОПН требуется только для того, чтобы ограничить коммутационные перенапряжения, например, в кабельных сетях, ОПН на ток 5 кА вполне достаточен, потому что ожидаемые токи разряда относительно небольшие.

Минимальные расстояния, указанные изготовителем между ОПН, а также между ОПН и заземленными элементами подстанций, должны выдерживаться. Любые изменения должны утверждаться только после соответствующих испытаний уровня изоляции.

5.5. Генератор присоединен к линии среднего напряжения, подверженной грозовым перенапряжениям.

Если генератор, находящийся под нагрузкой, внезапно отключить от сети, напряжение генератора мгновенно повысится, пока стабилизатор напряжения не подкорректирует его. Отношение этого временного перенапряжения к нормальному рабочему напряжению называют коэффициентом сброса нагрузки η . Величина его может достигать 1.5. Время воздействия его t лежит в пределах от 3 до 10 с. Рабочее напряжение U_c ОПН выбирается поэтому на основании этих двух величин, как описано в главе 3.3.

$$U_c \geq \frac{\eta \cdot U_m}{T}$$

для ОПН между фазой и землей

5.6. Защита двигателей от перенапряжений.

Если высоковольтный двигатель отключить в момент пуска, он подвергается опасности перенапряжения из-за многократного повторного зажигания дуги в выключателе. Повторное

зажигание дуги происходит наиболее часто, если ток в выключателе менее 600 А. Чтобы защищать двигатели, ОПН должны быть установлены непосредственно на зажимах двигателя или непосредственно на выключателях. ОПН должны выбираться в соответствии с рекомендациям, изложенными в разделе 3.

5.7. Защита кабельной оболочки высоковольтных кабелей.

По тепловым причинам и с целью уменьшения потерь в кабеле, кабельная оболочка или экран высоковольтных кабелей заземляются только с одного конца. Незаземленный конец должен защищаться от наведенных перенапряжений с помощью ОПН. Критическим критерием для выбора ОПН является напряжение U , наведенное в кабеле в случае короткого замыкания. Это напряжение зависит от конструкции кабеля и условий его прокладки в кабельном канале, но в общем оно не превышает 0.3 кВ на 1 кА тока короткого замыкания и 1 км длины кабеля. Рабочая точка, определяемая величиной наведенного напряжения и и длительностью протекания тока короткого замыкания t , должна лежать ниже характеристики устойчивости, чтобы гарантировать правильность выбора ОПН.

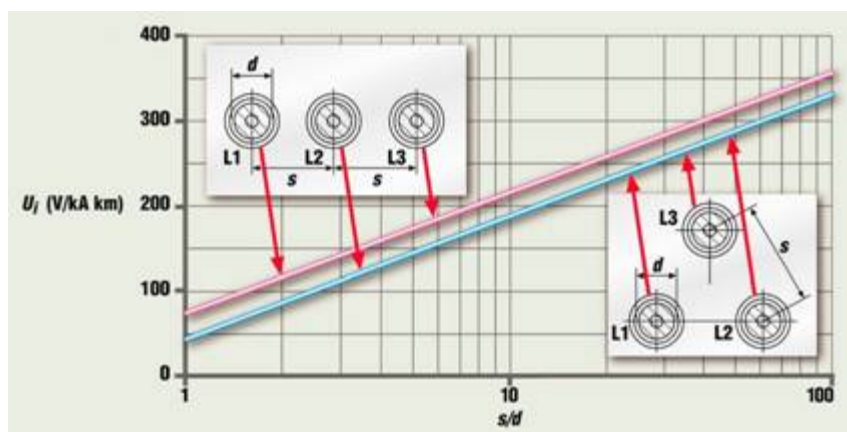


Рис. 8: Наведенное напряжение u_t в кабельной оболочке или экране на 1 кА тока короткого замыкания и 1 км длины кабеля в зависимости от конструкции кабеля.

для ОПН между оболочкой или экраном и землей

$$U_c \geq \frac{U_i}{T} = \frac{u_i \cdot I_k \cdot L}{T}$$

Где I_k - максимальный ток короткого замыкания, и L - длина незаземленной секции кабеля.

5.8. Металлоксидные ОПН для сети постоянного тока.

В сетях постоянного тока удары молнии или переключения также могут вызывать перенапряжения, которые повредят машины и оборудование. До настоящего времени пока не было опубликовано ни одного международного стандарта или инструкции по установке ОПН в этих сетях. Тем не менее, ОПН могут успешно использоваться в таких сетях, чтобы защитить оборудование. Металлоксидные ОПН без искровых промежутков идеальны для данного применения потому, что в них отсутствует сопровождающий ток, который в сетях постоянного тока убирается с большим трудом.

Из-за разного воздействия напряжения на блоки резисторов, ОПН, предназначенные для систем переменного напряжения, не могут использоваться в системах постоянного тока. Очень важно, чтобы применение специальных ОПН в системах постоянного тока подтверждалось изготовителем. С ним же нужно консультироваться и по поводу габаритных размеров ОПН.