

# Металлоксидные ограничители перенапряжения

## Выбор ограничителей перенапряжения и их применение в распределительных сетях среднего напряжения

### 1. Введение

### 2. Metalлоксидные (МО) ограничители перенапряжения (ОПН) среднего напряжения

- 2.1. Конструкция ОПН
- 2.2. Принцип действия ОПН
- 2.3. Выбор параметров ОПН

### 3. Выбор ОПН

- 3.1. Эффект воздействия временных перенапряжений на МО ОПН
- 3.2. Значение номинального напряжения ОПН ( $U_n$ )
- 3.3. Выбор ОПН и определение длительно-допустимого рабочего напряжения ( $U_c$ )
- 3.4. Примеры и частные случаи
  - 3.4.1. Сети с компенсацией тока замыкания на землю или с изолированной нейтралью
  - 3.4.2. Сети с изолированной нейтралью и с автоматическим отключением тока замыкания на землю
  - 3.4.3. Сети с заземленной нейтралью ( $E \leq 1.4$ )
  - 3.4.4. Сети с заземленной нейтралью ( $E > 1.4$ )
  - 3.4.5. Межфазное включение ОПН (схема «Нептун»)
  - 3.4.6. Напряжение сети с гармоническими составляющими

### 4. Защита

- 4.1. Защитный уровень ОПН
- 4.2. Защитная зона ОПН

### 5. Специальные случаи применения ОПН

- 5.1. Защита кабеля при переходе воздушной линии в кабельную
- 5.2. Трансформатор в конце кабеля
- 5.3. Трансформатор, непосредственно подключенный с одной стороны к воздушной ЛЭП
- 5.4. ОПН в закрытых элегазовых распредустройствах среднего напряжения
- 5.5. Генератор, присоединенный к линии среднего напряжения
- 5.6. Защита двигателей
- 5.7. Защита оболочек высоковольтных кабелей
- 5.8. МО ОПН для сети постоянного тока

### 6. Консультирование по вопросам применения ОПН

# 1. Введение

Оборудование электрических сетей подвергается многим опасным воздействиям. Одна из главных опасностей - перенапряжение. Увеличение стоимости электрооборудования не позволяет проектировать его с изоляцией, которая выдерживала 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.у.». Эта единица определяется как

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

где  $U_m$  – максимальное допустимое напряжение для оборудования, определяемое как действующее значение межфазного (линейного) напряжения при нормальном режиме работы сети. Фактическое напряжение сети обычно меньше, чем  $U_m$ .

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

Таблица 1: Значение 1р.у. для различных значений  $U_m$

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

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

## – 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  $\sqrt{3}$  р.у., так что они, как правило, не представляют угрозы для оборудования. Тем не менее, они являются критическим фактором для правильного выбора ОПН.

Феррорезонанс в сети может также привести к очень высоким перенапряжениям, в основном, сетевой частоты. ОПН защищают изоляцию трансформатора от повреждений, вызванных такими 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.

#### – Коммутационные перенапряжения

Происходят во время переключений и представляют собой быстро затухающие колебания. Частота колебаний часто достигает нескольких кГц, а амплитуда может достигать до 3 р.у.

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 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. появляются, если выключатель работает слишком медленно, и возникает 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 или заплывающие замыкания на землю), то их частое повторяющееся воздействие может привести к разрушению ОПН из-за перегрева.

#### – 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, перекрываются дугой, обеспечивая тем самым естественную защиту от перенапряжений. В сети среднего напряжения амплитуда, остающаяся после такого перекрытия дугой изоляторов, может достигать значения до 10 р.у.

Удар молнии вблизи 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 МО ОПН. Напротив, в сетях среднего напряжения все еще устанавливаются обычные вентильные разрядники. В последнее время МО ОПН без искровых промежутков получили широкое распространение и в этих сетях. Эта замена оправдала себя в 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 стал возможным при изготовлении 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, МО 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 волоконно-армированная структура либо полностью охватывает резисторные блоки, либо стягивает их по концам, придавая конструкции жесткость и прочность. 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 меньше диапазон остающегося напряжения ОПН.

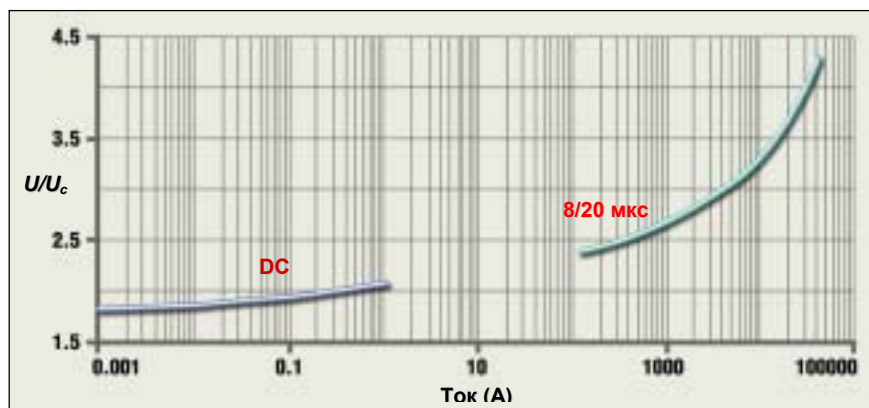


Рис. 1: Типичная вольт-амперная характеристика МО ОПН на 10 кВ, Класс 1

Поскольку МО ОПН не имеют искровых промежутков, и их нелинейность настолько велика, что при нормальных эксплуатационных режимах ток, протекающий через резисторы, очень мал, в проводящее состояние ОПН переходит непрерывно и срабатывает практически без задержки (в зависимости от вольт-амперной характеристики используемых МО дисков).

Другими словами, отсутствует задержка в срабатывании, как это имеет место в разрядниках с искровыми промежутками, где сначала должно быть превышено пробивное перенапряжение промежутков. Это означает, что МО ОПН имеют два существенных преимущества. Во-первых, МО ОПН надежно ограничивает напряжение до безопасных значений даже для импульсов с крутым фронтом и даже в самом начале импульса перенапряжения. Во-вторых, не существует пути, по которому коммутационные импульсы с небольшой амплитудой могли бы "обходить" ОПН.

Когда уровень перенапряжения спадает, ток в резисторах уменьшается в соответствии с характеристикой МО дисков, а сопровождающий ток, характерный для разрядников с искровыми промежутками, в ОПН не возникает. Это особенно важно в сетях постоянного тока, потому что отсутствует прохождение тока через нуль, необходимое для гашения дуги, 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 сетях постоянного тока, предполагая правильный выбор МО ОПН.

### **2.3 Выбор параметров ОПН**

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

### 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, проходящая через ОПН, приводит к выделению энергии и незначительному повышению его температуры относительно температуры окружающего воздуха.

Когда напряжение повышается, активная составляющая тока в резисторах и выделение энергии быстро растет. Однако, благодаря своей массе ОПН не разрушается мгновенно, а только нагревается до определенной степени. Если величина и длительность перенапряжения ниже определенных величин, ОПН не будет поврежден. На рис. 2 показаны допустимые величина и длительность воздействия перенапряжения промышленной частоты на ОПН до достижения термического разрушения. Нижняя кривая допустимого временного перенапряжения - для предварительно нагруженного высокоимпульсным током ОПН (ОПН на 5 кА и 10 кА, Класс 1 нагружаются импульсом 4/10 мкс и амплитудой 65 кА или 100 кА). Вторая, верхняя кривая дана для ОПН без предварительного нагружения.

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

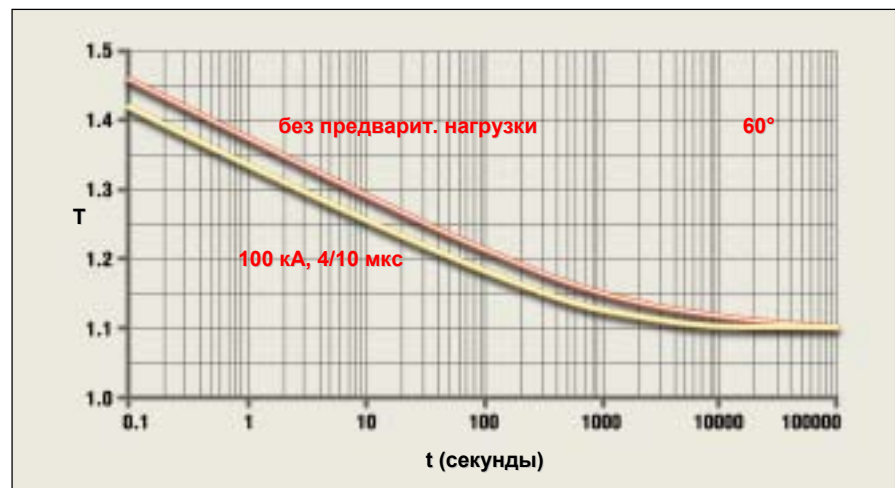


Рис. 2: Допустимые временные перенапряжения ОПН, TOV диаграмма,

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

Следующий пример объясняет использование диаграммы:

ОПН 10 кА, Класс 1 с  $U_c$  6 кВ работает при напряжении 6 кВ на его зажимах в течение неопределенно долгого 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 возрастает приблизительно до 7.7 кВ ( $T = 7.7/6.0 \approx 1.28$ ). Защита сети спроектирована на отключение такого рода повреждений менее чем за 3 с. Диаграмма показывает, что ОПН выдержит это временное перенапряжение. При задержке времени более 3 с рабочая точка окажется над нижней кривой допустимых перенапряжений, следствием чего может быть термическое разрушение ОПН.

### 3.2. Значение номинального напряжения $U_n$ ОПН

Номинальное напряжение  $U_n$  не имеет никакого специфического или практического значения для пользователя, потому что его величина зависит от испытательных условий, определяемых согласно МЭК 60099-4. Нормируемое напряжение служит просто вспомогательной величиной для определения рабочих характеристик.

### 3.3. Выбор ОПН и определение длительно-допустимого 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 или между нейтралью и землей. Обычно напряжение может быть рассчитано, исходя из максимального межфазного (линейного) напряжения системы. Если это напряжение неизвестно, или если оно изменяется 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 режимом заземления нейтрали. Продолжительность перенапряжения зависит от условий работы сети. Глухозаземленные сети обычно отключаются в течение нескольких секунд. Сети с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостного тока на землю могут продолжать работать с замыканием на землю в течение нескольких часов. Величина ожидаемого временного перенапряжения часто определяется с использованием фактора замыкания на землю  $E$ . Тогда временное перенапряжение  $U_{TOV}$  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 и надежна.

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

- $U_c$  должно быть больше или равняться длительно-допустимому напряжению, прикладываемому к зажимам ОПН. Для ОПН, подключенных к земле, должно выполняться следующее условие:

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

где  $U_m$  может быть заменено напряжением системы  $U_s$ .

- Воздействие на ОПН временных перенапряжений должно укладываться ниже или на кривой допустимых временных перенапряжений. С целью проверки также должна быть определена как максимальная величина, так и длительность перенапряжения. В целях безопасности всегда используют нижнюю из двух кривых, если нет 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 в системе  $t$  и кривой допустимых временных перенапряжений.

### 3.4. Примеры и частные случаи

#### 3.4.1. Сети с компенсацией тока замыкания на землю или с изолированной нейтралью

В этих сетях напряжение «фаза-земля» на неповрежденных фазах в основном не будет превышать  $U_m$ .

$$U_c \geq U_m$$

для ОПН, включенных 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 замыкания на землю  $E$  может достигать величины 1.85. В таких случаях рабочее напряжение  $U_c$  должно быть увеличено соответственно.

#### 3.4.2. Сети с изолированной нейтралью и с автоматическим отключением замыкания на землю

Амплитуда перенапряжений достигает тех же значений, что и в сетях с компенсацией тока замыкания на землю. Быстрое отключение, однако, может позволить использовать ОПН с более низким рабочим напряжением  $U_c$  и, соответственно, с лучшим уровнем защиты.

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

для ОПН, включенных между фазой и землей

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

для ОПН, установленных между нейтралью трансформатора и землей

#### 3.4.3. Сети с заземленной нейтралью $E \leq 1.4$

Если у достаточного количества трансформаторов нейтрали заземлены, фактор замыкания не будет превышать величины 1.4 для всей сети. Из-за большого значения тока замыкания на землю и короткого замыкания отключение в таких сетях происходит очень быстро. При этом можно использовать ОПН с более низким рабочим напряжением  $U_c$  и, соответственно, может быть выбран лучший уровень защиты.

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

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, включенных между нейтралью трансформатора и землей

#### 3.4.4. Сети с заземленной нейтралью $E > 1.4$

Если нейтрали трансформаторов заземлены через сопротивление с целью ограничения токов замыкания на землю и короткого замыкания, напряжение на неповрежденных фазах повышается до  $U_m$ . В случае чисто активного сопротивления заземления напряжение может быть до 5% выше  $U_m$ .

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

для активного сопротивления заземления

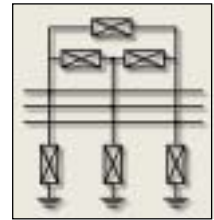
#### 3.4.5. Межфазное включение ОПН (схема «Нептун»)

В некоторых схемах, например, с трансформаторами 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 фазой и землей:

$$U_c \geq U_m$$

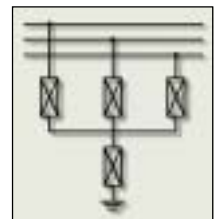
для всех ОПН



Разновидностью такой конфигурации является схема «Нептун», 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 с гармоническими составляющими

Из-за нелинейной  $U-I$  характеристики критическое значение для МО ОПН – амплитудное значение рабочего напряжения. Если искажение формы кривой напряжения велико, то есть содержит высшие гармоники, необходимо учитывать, что амплитудное значение напряжения может существенно отличаться от увеличенного в  $\sqrt{2}$  раз действующего значения напряжения сети. Если это отклонение составляет менее чем 5%, величина длительно-допустимого рабочего напряжения может 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 скачки, наличие пиков и постоянных составляющих напряжения указывают на то, что необходимо принимать во внимание дополнительные критерии при выборе ОПН.

## 4. Защита

### 4.1. Защитный уровень ОПН

Уровень защиты  $U_{res}$  определяется как максимальное остающееся напряжение на зажимах, 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 при значениях токов, кратных номинальному разрядному току.

Коммутационные перенапряжения имеют амплитуды намного ниже, чем перенапряжения от молний. Именно поэтому должны рассматриваться максимальные остающиеся напряжения для коммутационных импульсов с формой волны 30/60 мкс. В технических данных они указываются при разных амплитудах волны тока, например, 125 А 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 любой момент зависят не только от времени, но и от положения точки на проводнике, где производится измерение. Разности потенциалов могут быть очень большими, особенно вблизи мест, где происходит изменение полного сопротивления проводника (например, в точке перехода воздушной ЛЭП в кабель или в точке подсоединения отпайки). Причина этого – отражение волны в этих, так называемых, точках отражения. Что касается применения ОПН, то необходимо учитывать, что напряжение на защищаемом оборудовании не всегда равно остающемуся напряжению на ОПН в один и тот же момент времени. Чем дальше ОПН от оборудования, тем больше может быть 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 сетях среднего напряжения защитная зона ОПН  $L$  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 защищаться;  
 $U_p$  = уровень защиты ОПН (остающееся напряжение при номинальном токе разряда);  
 $S$  = крутизна импульса перенапряжения.

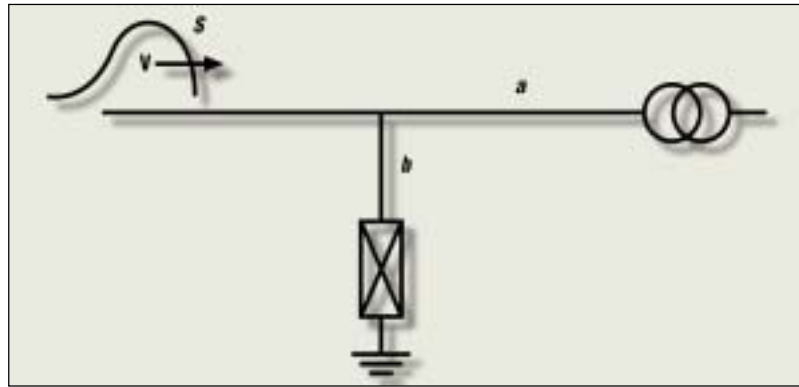


Рис. 3: Схема установки ОПН

Типичные значения  $S$  - 1550 кВ/мкс (для воздушных линий на деревянных опорах) и 800 кВ/мкс (для воздушных линий с заземленными траверсами). Для сетей среднего напряжения эти значения приблизительно определяют следующие защитные зоны:

$$L = 2,3 \text{ м}$$

Воздушная сеть с деревянными опорами

$$L = 4,5 \text{ м}$$

Воздушная сеть с заземленными траверсами

В упрощенной схеме на рис. 3 сумма расстояний  $a$  и  $b$  не должна превышать защитную зону  $L$ :

$$a + b \leq L$$

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 емкости трансформатора на защитную зону не может не учитываться. Емкость может иногда приводить к серьезному уменьшению защитной зоны  $L$ ; в зависимости от расстояния  $b$  это уменьшение может составлять 80 % зоны. Это особенно важно для воздушных линий на деревянных опорах. Например, для сетей напряжением до 24 кВ расстояние  $b$  должно быть не больше 1 м. Защитная зона  $L$  составляет около 2 м, оставляя 1 м для расстояния  $a$ . Для сетей напряжением выше 24 кВ максимальная расстояние  $b$  составляет только 0,6 м.

Ясно, что защитный эффект ОПН во многом зависит от его расположения и схемы подключения проводников. 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 наихудший, потому что, а это очевидно, защитный эффект ОПН может быть существенно улучшен без больших дополнительных затрат.

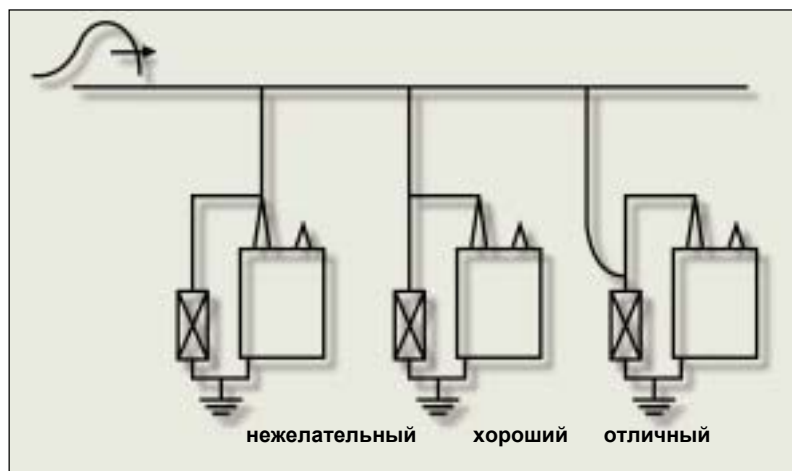


Рис. 4: Варианты подключения ОПН для защиты трансформатора

В некоторых случаях довольно трудно, или даже невозможно не превышать максимальное расстояние  $b$  равное 1 м. или 0.6 м. для воздушной ЛЭП на деревянных опорах. В таких случаях может помочь изменение конфигурации. Как правило, достаточно заземлить траверсы последних 3 опор перед трансформатором. Это уменьшит 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 сетях 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.

## 5. Специальные случаи применения ОПН

### 5.1. Защита кабеля при переходе воздушной линии в кабельную

В большинстве случаев необходимо защищать оба конца кабеля с помощью ОПН. Для очень коротких участков бывает достаточно защитить кабель только с одной стороны.

Кабель, соединяющий воздушную ЛЭП и подстанцию, подвергается воздействию перенапряжений только со стороны воздушной ЛЭП. Поэтому ОПН должны быть установлены в точке перехода воздушной ЛЭП в кабельную. ОПН с другой стороны кабеля можно не устанавливать, если длина кабеля  $L_{Кк}$  не превышает значений, указанных в Таблице 2.

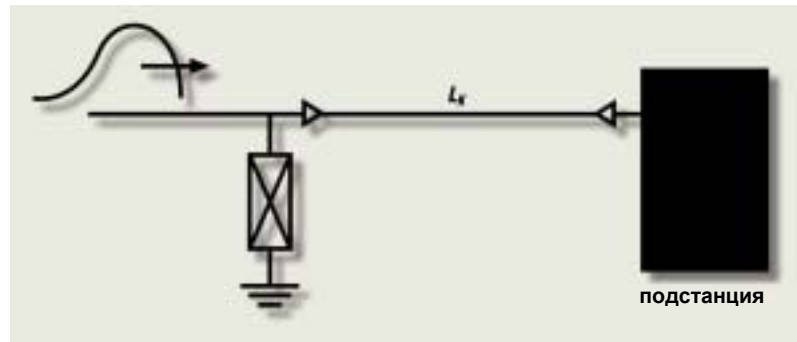


Рис. 5: Схема подключения воздушной ЛЭП к подстанции

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

$U_m$ (кВ)	$L_K$ (м)			
	Деревянная опора		Заземленная траверса	
$Z(\Omega)$	30	60	30	60
3.6	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
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

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

Для оптимальной защиты концевых кабельных муфт и для ослабления бегущей волны ОПН должны быть установлены непосредственно возле концевых кабельных муфт. Все проводники для подсоединения ОПН (включая проводник заземления!) должны быть как можно меньшей длины для снижения напряжения в петлях проводников. Кабельная оболочка, или экран, должна быть присоединена к заземляемому зажиму ОПН.

Для кабелей, установленных между двумя участками воздушной ЛЭП, часто достаточно установить ОПН только с одной стороны, хотя импульсы перенапряжения могут приходиться с обеих сторон. В этом случае уровень защиты ОПН от перенапряжений, приходящих с незащищенной стороны, настолько снижен, что предлагаемая схема с одним ОПН рекомендуется только для очень коротких кабелей.

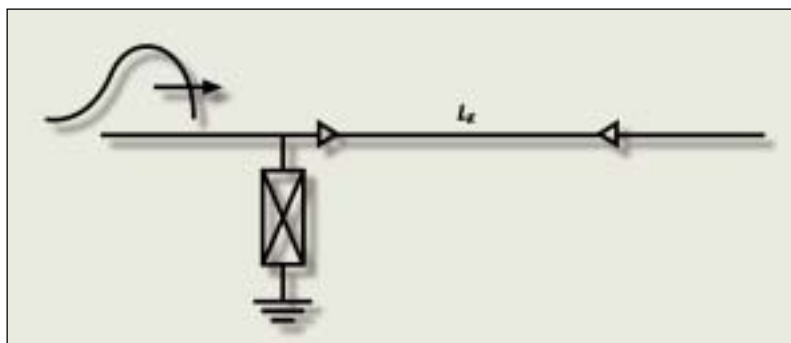


Рис. 6: Короткая кабельная вставка в воздушной ЛЭП

Если кабель смонтирован как часть незаземленной воздушной ЛЭП на деревянных опорах (см. таблицу 3), защитная зона ОПН чрезвычайно мала. В этой схеме "естественная защита от перенапряжений" (см. выше), обеспечиваемая изоляторами в случае прямого удара молнии, очень ограничена. Значения  $L_K$ , приведенные в таблице, применимы к ОПН с номинальным током разряда  $I_n = 10$  кА при условии, что волновое сопротивление неизменно вдоль всего участка кабеля. Места разветвления кабелей и другие точки отражения приводят к дальнейшему сокращению  $L_K$  из-за отражений.

$U_m$ (кВ)	$L_K$ (м)			
	Деревянная опора		Заземленная траверса	
$Z(\Omega)$	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

Таблица 3: Максимальная длина  $L_K$  кабеля между двумя участками воздушной ЛЭП с защитой с одной стороны (длина соединяющих проводников между ОПН и кабелем макс. 1 м)

## 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 ОПН  $A_2$  защитит понижающий трансформатор. Здесь также решающее значение имеет расстояние между ОПН и трансформатором.

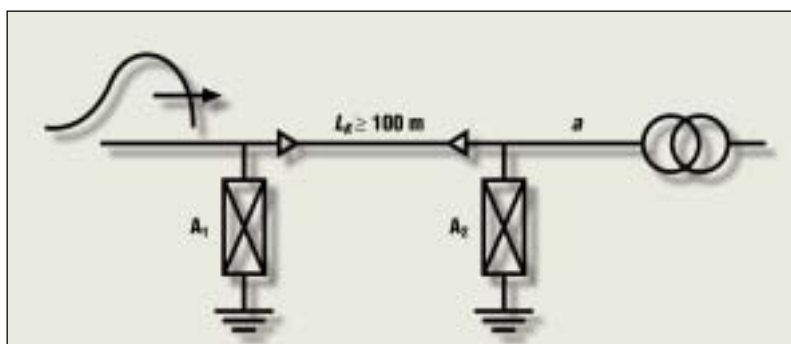


Рис. 7: Второй ОПН установлен между кабелем и трансформатором

В следующем примере трансформатор подключен к воздушной ЛЭП, подверженной грозовым перенапряжениям, через кабель длиной  $L_K$  свыше 100 м. Как было объяснено выше, ОПН необходимы и в точке перехода воздушной ЛЭП в кабельную, и в конце кабеля. ОПН  $A_1$  служит для защиты кабеля, а ОПН  $A_2$  ограничивает перенапряжения,

вызванные отражением волн от конца кабеля. ОПН подсоединены непосредственно к концевым муфтам кабеля.

$U_m$ (кВ)	$a$ (м)			
	Деревянная опора		Заземленная траверса	
$Z(\Omega)$	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

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

В этой схеме, если расстояние  $a$  не превышает значений, приведенных в таблице 4, трансформатор будет достаточно защищен ОПН  $A_2$ . Предполагается, что емкость трансформатора составляет 2 нФ. Меньшие значения емкости увеличивают максимально допустимое расстояние.

### 5.3. Трансформатор, непосредственно подключенный с одной стороны к воздушной ЛЭП

В общем случае только трансформатор, подключенный к воздушной ЛЭП, подверженной грозовым перенапряжениям, нуждается в установке ОПН для защиты от перенапряжений. Особый случай, когда высоковольтный трансформатор связывает сети высокого и среднего напряжения, и только высоковольтная сеть считается подверженной опасности грозовых перенапряжений. При определенных условиях и на стороне среднего напряжения может потребоваться защита от перенапряжений.

Поскольку грозовые перенапряжения - очень быстрые процессы, приблизительно 40 % первоначальной амплитуды перенапряжения передается емкостным путем на сторону среднего напряжения трансформатора. Для того, чтобы ограничить эту проблему, соответствующие инструкции рекомендуют подключать на стороне среднего напряжения длинный кабель, конденсатор малого сопротивления или рекомендуют комбинацию из этих двух способов. Альтернативное решение, с применением ОПН, имеет два явных преимущества:

- индуктивно переданные перенапряжения могут быть увеличены емкостями. Ограничение амплитуды дополнительного перенапряжения требует тщательного подбора последовательных демпфирующих резисторов. В решении, использующем ОПН без искровых промежутков, этот эффект даже не должен рассматриваться.
- пробой изоляции между первичной и вторичной обмотками трансформатора может привести к тому, что сторона среднего напряжения оказывается включенной на сеть высокого напряжения. Если ОПН были установлены для защиты стороны среднего напряжения, они быстро разрушатся и вызовут короткое замыкание. ОПН как бы "жертвует" собой, чтобы защитить остальное оборудование, и повреждения будут ограничены только трансформатором. Поскольку ОПН фактически разработаны с учетом того, что они могут разрушаться в любых 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 передаются от сети среднего напряжения на низковольтную сторону. Вот почему ОПН на низкой стороне рекомендуются даже в том случае, когда только сторона среднего напряжения подвержена опасности удара молнии.

Могут ли, и до какой степени, только низковольтные ОПН защитить трансформатор от удара молнии с низковольтной стороны - является дискуссионным вопросом. Многие специалисты считают, что эта защита является совершенно достаточной. Однако, снова и снова поступают сообщения о повреждении трансформаторов, которые могут быть отнесены к грозовым перенапряжениям со стороны низкого напряжения. Предположительно, что относительно медленные динамические перенапряжения в виде переходных процессов индуктивно передаются на сторону среднего напряжения пропорционально коэффициенту трансформации трансформатора и достигают величин, при которых пробивается изоляция. В зонах с высокой грозовой активностью желательно установить ОПН с обеих сторон, даже если опасности грозовых перенапряжений подвержена только сторона низкого напряжения.

#### **5.4. ОПН в закрытых элегазовых распределительных устройствах среднего напряжения**

Обычно специальные ОПН внутренней установки монтируют около концевых кабельных муфт для защиты элегазовых выключателей среднего напряжения. Если ячейка подстанции связана с воздушной ЛЭП, подверженной опасности удара молнии, номинальный ток разряда ОПН должен быть 10 кА, Класс 1. Это справедливо и в том случае, когда 10 кА ОПН уже установлен в точке перехода воздушной ЛЭП в кабель. Если кабельная вставка длинная, на подстанции можно установить ОПН на 5 кА, потому что ожидаемый остающийся ток разряда уменьшается с увеличением длины кабеля, а ОПН в точке перехода воздушной ЛЭП в кабельную будет брать большую часть тока разряда на себя.

Если ОПН нужен только для ограничения коммутационных перенапряжений, например, в кабельных сетях небольшой плотности, ОПН 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, присоединенный к линии среднего напряжения**

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

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

для ОПН между фазой и землей

#### **5.6. Защита двигателей**

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 на выключателях. ОПН должны выбираться в соответствии с рекомендациями, изложенными в разделе 3.



## 5.7. Защита оболочек высоковольтных кабелей

По тепловым причинам и с целью уменьшения потерь в кабеле кабельная оболочка или экран высоковольтных кабелей чаще всего заземляются только с одного конца. Незаземленный конец должен защищаться от перенапряжений с помощью ОПН.

Критическим условием для выбора ОПН является напряжение  $U_i$ , наведенное в кабеле в случае короткого замыкания. Это напряжение зависит от конструкции кабеля и геометрии 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  $U_i$  и временем отключения тока короткого замыкания  $t$ , должна лежать ниже кривой допустимых временных перенапряжений, чтобы гарантировать правильность выбора ОПН.

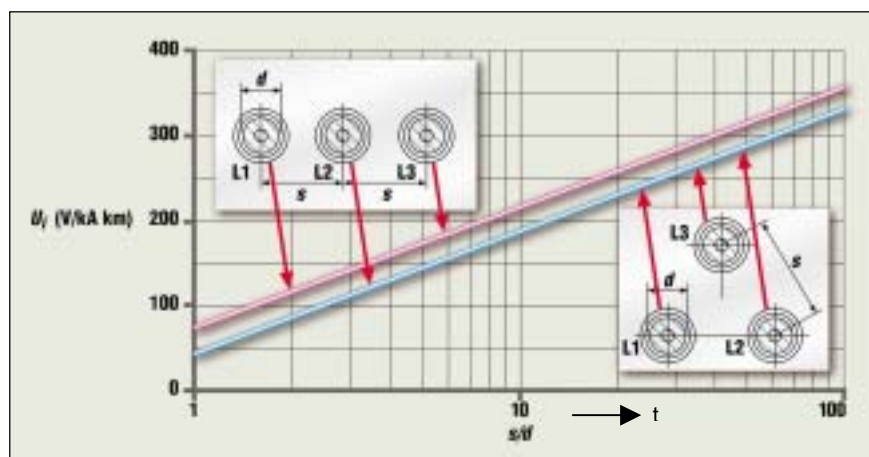


Рис. 8: Наведенное напряжение  $u_i$  в кабельной оболочке или экране на 1 кА тока короткого замыкания и 1 км длины кабеля в зависимости от геометрии прокладки

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

для ОПН между оболочкой или экраном и землей

где  $I_k$  - максимальный ток короткого замыкания и  $L$  - длина незаземленной секции кабеля.

## 5.8. МО ОПН для сети постоянного тока

В сетях постоянного тока удары молнии или переключения также вызывают перенапряжения, которые могут повредить 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. МО ОПН без искровых промежутков идеальны для данного применения потому, что в них отсутствует проблема отключения сопровождающего тока, которой трудно избежать в сетях постоянного тока, и что требует дополнительных затрат.

Из-за различия типа воздействия на диски резисторов ОПН, предназначенные для систем переменного тока, не могут просто использоваться в системах постоянного тока. Очень важно, чтобы применение специальных ОПН в системах постоянного тока подтверждалось изготовителем. С производителем же нужно консультироваться и по поводу правильного подбора ОПН.

## 6. Консультирование по вопросам применения ОПН

Многочисленные дискуссии с заказчиками подтвердили, что они приветствуют интенсивные консультации по применению ОПН. Типичный случай, где экспертная поддержка может быть критична - планируемое изменение технологии, например, переход от разрядников с искровыми промежутками в фарфоровом корпусе к МО ОПН в полимерном корпусе. Правильный выбор ОПН при обновлении оборудования на существующем предприятии - другой актуальный случай. Новые применения, например, в сетях постоянного тока или развитие концепции по защите от перенапряжений целых систем часто требуют глубокого анализа как исходной ситуации, так и общих требований.

В рамках данного документа нам удалось лишь кратко перечислить и обозначить те факторы, которые должны приниматься во внимание при выборе ОПН.

Поэтому мы предлагаем нашим заказчикам всестороннюю поддержку и консультационные услуги по всем вопросам защиты от перенапряжений.