

ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ОСЖД)

I издание

Разработано экспертами Комиссии ОСЖД
по инфраструктуре и подвижному составу
10-11 сентября 2014 г., Комитет ОСЖД, г. Варшава

Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД
по инфраструктуре и подвижному составу
21-24 октября 2014 г., Комитет ОСЖД, г. Варшава

Дата вступления в силу: 24 октября 2014 г.

P 638

**РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ВЫБОРУ И ПРИМЕНЕНИЮ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ**

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Критерии выбора параметров ОПН	4
2.1. Устойчивость к длительно влияющему напряжению	5
2.2. Устойчивость к кратковременному превышению рабочего напряжения.....	6
2.3. Номинальный ток	7
2.4. Пропускная способность	7
2.5. Защитные параметры	9
3. Общий алгоритм выбора ОПН. Корректировка параметров.....	12
4. Методика выбора ОПН.....	13
4.1. Расчет ОПН для постоянного тока.....	13
4.2. Расчет ОПН для переменного тока.....	16
4.3. Примеры выбора ОПН, рекомендации по их применению.....	18

1. Введение.

Надежная работа электрифицированных железных дорог во многом определяется организационно-техническими мероприятиями, направленными на минимизацию нагрузок, влияющих на изоляцию контактной сети и электрооборудования. Кроме нагрузок, которые выдерживаются в нормальном режиме работы, на изоляцию влияют разного рода кратковременные, но опасные перенапряжения. Защита от атмосферных перенапряжений осуществляется молниеотводящими устройствами, роговыми и трубчатыми разрядниками. Вентильные разрядники применяются как средство защиты элементов электрических систем и силового оборудования от воздействий коммутационных перенапряжений. В это время в электросетях расширяется применение новых защитных аппаратов, выполненных на резисторах с резконелинейными вольтамперными характеристиками, которые получили название - ограничители перенапряжений (ОПН). Эффективность применения ОПН заключается в их возможности глубокого ограничения как атмосферных, так и коммутационных перенапряжений.

В отличие от разрядников старого типа для ОПН регламентировано гораздо большее количество характеристик, характеризующих условия эксплуатации и функциональность их назначения. К ним относятся долгосрочные и кратковременно допустимые напряжения, допустимые токи с различной продолжительностью и остаточные напряжения при номинальных грозовых токах и токах с крутым фронтом волны, при токах коммутационных импульсов.

МЭК рекомендует в маркировку разрядника вводить следующие параметры:

- длительно допустимое напряжение;
- нормированное напряжение;
- номинальный разрядный ток;
- нормированный выдерживаемый (допустимый) ток короткого замыкания.

Также следует указывать:

- наименование изготовителя или его товарный знак;
- год изготовления;
- серийный номер изделия.

Перечень параметров и характеристик ОПН, регламентированных МЭК 60099-4, представлен в Таблице 1.

Таблица 1

Длительно допустимое напряжение (действующее значение), $U_{д}$, кВ	
Нормированное напряжение (действующее значение), $U_{нор}$, кВ	
Номинальный разрядный ток грозового импульса с волной 8/20мкс, $I_{н}$, кА	
Остаточное напряжение при токе грозового импульса, $U_{ост.г.}$, кВ	500 А
	5 000 А
	10 000 А
	20 000А
Остаточное напряжение при номинальном токе с крутым фронтом волны 1/4мкс, $U_{ост. кр}$, кВ	
Остаточное напряжение при токе коммутационного импульса с волной 30/60мкс, $U_{ост. к}$, кВ	125
	250
	500
Длительный (2000 мкс) ток, А	
Пропускная способность (количество нормированных импульсов тока)	
Удельная энергоемкость, $W_{уд}$, кДж/кВ	
Классификационное напряжение (при 2мА), кВ	
Характеристики корпуса ОПН в соответствии с требованиями, установленными к линейным и подстанционным изоляторам, в том числе: - нормированный выдерживаемый ток короткого замыкания; - нормированная механическая прочность; - длина пути утечки, $L_{ут}$, мм	
Масса, кг	

2. Критерии выбора параметров ОПН.

Выбор необходимого ограничителя перенапряжений в общем случае сводится к поиску компромиссного решения между условиями обеспечения надежной и долгосрочной работы самого защитного аппарата и выполнения им защитных функций при перенапряжениях. Диаграмма итерационного выбора параметров характеристик ОПН, что соответствует рекомендации МЕК60099-5, приведена на рис. 1.

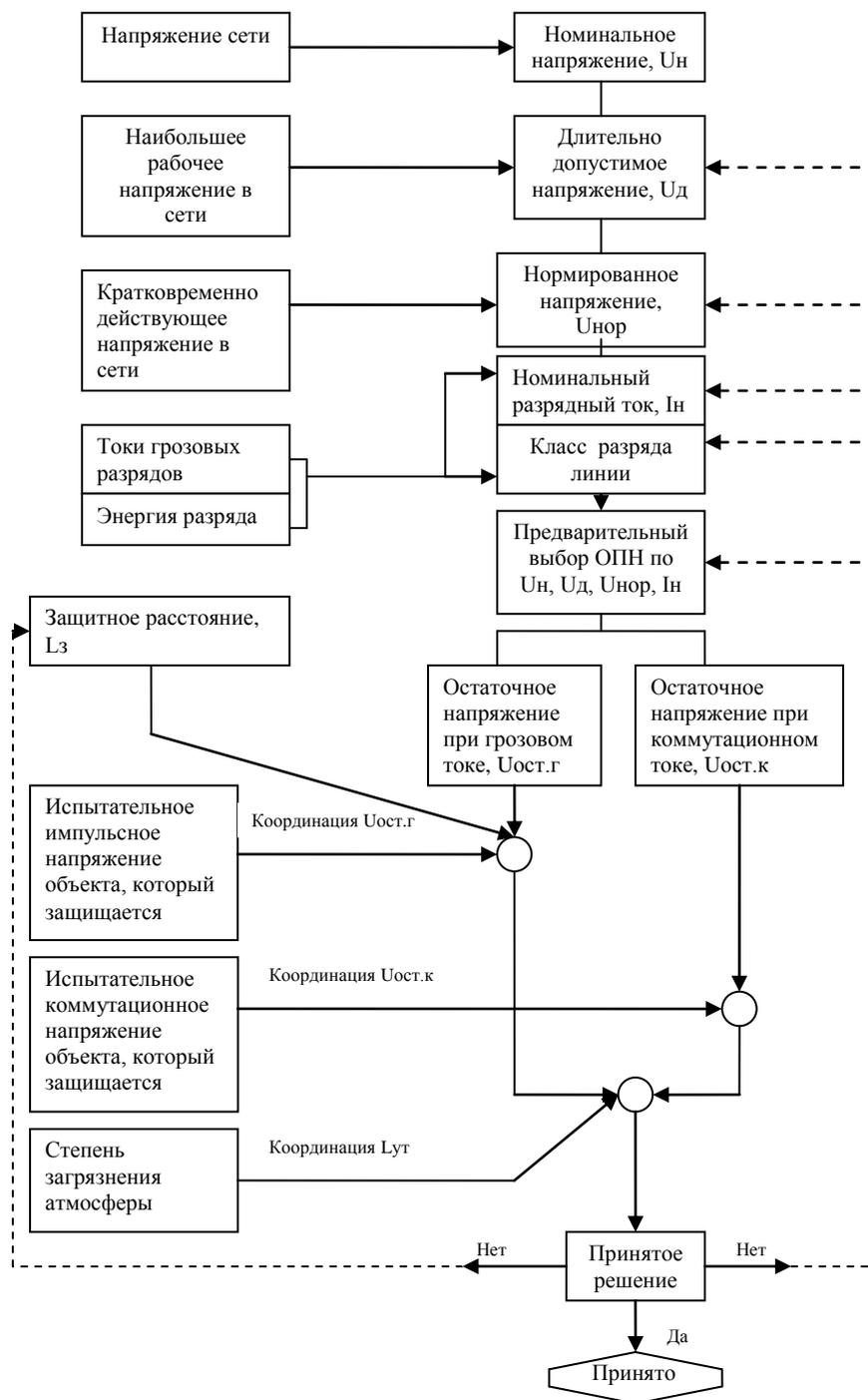


Рис. 1. Схема выбора ОПН.

Выбор ОПН осуществляется установлением их характеристик в следующей последовательности:

2.1. Устойчивость к длительно влияющему напряжению.

Длительно допустимое рабочее напряжение (U_d) определяется величиной рабочего напряжения сети и возможным колебанием напряжения. Как правило, на практике за длительно допустимое напряжение ОПН принимается напряжение, равное или большее наибольшему рабочему напряжению:

$$U_d \geq U_{н.р} \quad (1)$$

2.2. Устойчивость к кратковременному превышению рабочего напряжения.

В сети всегда имеют место кратковременные превышения напряжения выше наибольшего рабочего напряжения. Повышенное напряжение в сетях с заземленной нейтралью может продолжаться при замыкании фазы на землю от доли секунды до 10 с: при заземленной нейтрали через индуктивность - до нескольких часов в зависимости от оперативности устранения неполадок. Кратковременное повышение напряжения возникает в случае отключения нагруженного объекта, при этом амплитуда напряжения может достигать в зависимости от продолжительности до 1,5 крат рабочего напряжения и даже выше, если сброс нагрузки сопровождался резонансными явлениями. Кратковременные повышения напряжения относятся к коммутационным перенапряжениям, которые характеризуются невысоким уровнем и при них токи через нелинейные элементы не превышают установленных величин.

Экспериментальными исследованиями установлено (МЕК60099-5), что кратковременные перенапряжения в сети, как функция от их продолжительности, в интервале от 0,1 с до 100 с можно аппроксимировать следующим выражением:

$$U_{t,c} = U_{Ek} \times \left(\frac{T_t}{10} \right)^{-m}, \quad (2)$$

где $U_{t,c}$ - амплитуда кратковременного перенапряжения в сети;

U_{Ek} - амплитуда кратковременного перенапряжения, которая соответствует длительности 10 с;

T_t - длительность кратковременного перенапряжения;

m - показатель степени, который принимается равным 0,02.

Способность ОПН выдерживать кратковременные превышения напряжения определяет нормированное напряжение, $U_{нор}$. Этот параметр должен удовлетворять условию:

$$U_{нор} \geq U_{t,m} (T_t=10c) = U_{Ek} \quad (3)$$

где $U_{t,m}$ – кратковременные колебания напряжения в сети.

В случае с переменным напряжением в соотношении (3) под величиной нормированного напряжения $U_{нор}$ понимается его амплитудное значение.

Кроме требования (3), вольт-секундные характеристики ОПН в виде зависимости кратковременно выдерживаемого напряжения разрядником, $U_{t,p}$ от продолжительности воздействия, должны согласовываться с кратковременными колебаниями напряжения в сети, представляют в виде соотношения (4):

$$U_{t,p} \geq U_{t,m} \quad (4)$$

На практике принято сопоставлять между собой относительные величины: кратности кратковременных перенапряжений по наибольшему рабочему ($U_{н.р} = U_d$) или эквивалентному напряжению $U_{Эк}$ (3), как это показано на рис. 2.

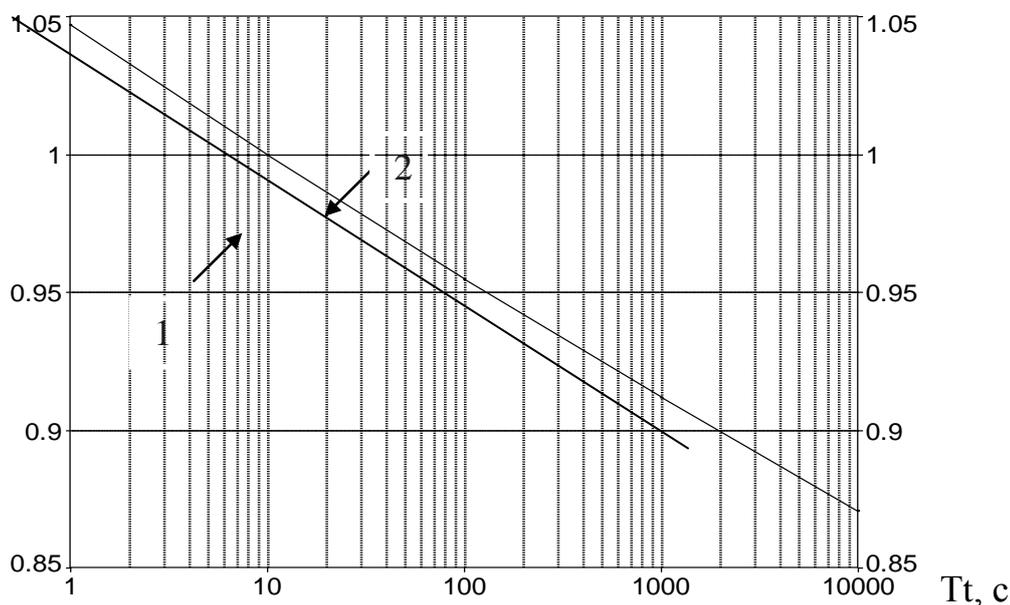


Рис. 2. Графическое представление соотношений (3) и (4): 1- $U_{т.м}/U_{Эк}$; 2- $U_{т.р}/U_{Эк}$

2.3. Номинальный ток.

Установка нормированного разрядного тока, I_n , имеет важное значение, поскольку защитный уровень ОПН от перенапряжений оценивается параметром I_n . Кроме того, способность ОПН абсорбировать энергию без выхода из тепловой устойчивости напрямую связана также с нормированным разрядным током.

Согласно МЭК 60099-4 для линий с наибольшим рабочим напряжением от 1 кВ до 245 кВ ожидаемые разрядные токи принимаются: 5 кА и 10 кА. Для линий от 1 кВ до 72,5 кВ с низким сопротивлением заземляющих устройств и с умеренной грозовой активностью, в случае расположения ОПН не далее 5 км друг от друга, принимается эффективным использование ОПН с номинальным разрядным током, 5 кА. А ОПН с $I_n = 10$ кА рекомендуется устанавливать на ответственных участках сети.

Для контактной сети, где грозовая активность относительно высокая, оправдано принять:

$$I_n = 10 \text{ кА} \quad (5)$$

2.4. Пропускная способность.

Через ОПН в «открытом» состоянии протекают сопровождающие токи сети, соответственно устойчивость ОПН к токам переходного состояния определяется допустимой энергией абсорбции, $W_{аб}$.

Устойчивость ОПН к выделяемой в нем энергии характеризуют их классы разряда линии, они, в свою очередь, определяются величинами номинальных, коммутационных и сильных токов (таблица 2).

Класс линейных разрядных токов ОПН.

Таблица 2.

Квалификация ОПН		Пиковое значение тока коммутационной волны, I_k , А	Сильный ток, $I_{н.с}$, кА
Класс линейного разрядного тока	Номинальный ток, I_n , А		
1 и 2	10 000	125 и 500	1кл- 65; 2кл- 100
3	10 000	250 и 1 000	100
4 и 5	20 000	500 и 2 000	100

При известных номинальных токах (см. табл. 2) и рабочих параметрах ОПН, который выбирается, контрольные уровни энергии W_k , с которыми сверяется допустимая энергия абсорбции, $W_{аб}$:

$$W_{аб} > W_k \{ W_{кл}, W_{кc} \}, \quad (6)$$

вычисляются по следующим формулам:

- в случае коммутации линии:

$$W = 2U_{ост.к} (U_e - U_{ост.к}) \frac{T_B}{Z_L}, \quad (7)$$

где U_e - амплитуда перенапряжения при замыкании фазы на землю (МЕК60071-2);

$U_{ост.к}$ - остаточное напряжение коммутационного импульса тока;

T_B - время пробега волны;

Z_L - волновое сопротивление линии.

- в случае включенных емкостных объектов:

$$W_{кc} = 0,5C \left[(3U_{м.р})^2 - (\sqrt{2}U_{нор})^2 \right], \quad (8)$$

где C – эквивалентная ёмкость объекта;

$U_{м.р} = \sqrt{2}U_n$ – пиковое значение рабочего напряжения;

$U_{нор}$ – нормированное напряжение ОПН.

Классы ОПН по пропускной способности.

Таблица 3

Класс	Номинальный ток, I_n , А	Пиковое значение тока коммутационной волны (2000мкс), $I_{пр}$, А	Удельная к рабочему напряжению энергия поглощения, $W_{уд}$, кДж/кВ	Сильный ток, $I_{н.с}$, кА
1	5 000-10 000	250-400	1-2	65
2	10 000	401-750	2,1-3,2	100
3	10 000	751-1 100	3,3-4,5	100
4	10 000-20 000	1 101- 1 600	4,6-6,0	100
5	20 000	1 601- 21 000	6,1-7,0	100

В соответствии с таблицей 3 принимаем:

$$W_{аб} = W_{уд} \times U_{н.р}$$

2.5. Защитные параметры.

2.5.1. Остаточное напряжение при грозовых перенапряжениях.

Для изоляции контактной сети угрозу представляют практически только грозовые перенапряжения. По этой причине выбор защитного уровня ОПН заключается в координации между выдерживаемым напряжением защищаемого объекта - изоляторов ($U_{в.имп}$) и остаточным напряжением ОПН при номинальных разрядных токах грозовых импульсов с крутизной фронта в диапазоне от 1 мкс до 8 мкс ($U_{ост.г}$). Коэффициент координации принимается равным 1,15, то есть:

$$U_{ост.г} \leq U_{в.имп} / 1,15 \quad (9)$$

При координации ОПН с изоляцией электрооборудования кроме требования (9) необходимо оптимизировать и место установки защитного ОПН. По возможности рекомендуется максимально приблизить ОПН к вводам оборудования, однако по разным причинам, в том числе, по экономическим соображениям - желанием одним ОПН охватить большее количество объектов, не всегда целесообразно устанавливать их в непосредственной близости к одному объекту. Координация в этом случае осуществляется с учетом линейных размеров линии и места подключения ОПН по эмпирической формуле МЭК 60071-2:

$$U_{к.имп} = U_{ост.г} + \frac{Q}{N} \times \frac{L_c}{L_{п} + L_{л}} \quad (10)$$

где $U_{к.имп} = U_{в.имп} / 1,15$ - координированное защитное импульсное напряжение;

$U_{ост.г}$ - защитный уровень импульсного напряжения ОПН;

Q – напряжение, которое зависит от конфигурации линии подхода к подстанции (табл. 4);

N - количество линий, присоединенных к подстанции;

$L_c = d + d_1 + d_p + d_2$ - суммарная длина присоединения ОПН с объектом (рис. 3);

$L_{п}$ - длина пролета линии;

$L_{л} = N_o / N_{л}$ - длина участка линии с нормированным уровнем отказа;

N_o - нормированное число отказов защищаемого оборудования;

$N_{л}$ - нормированное число простоя подходящей к подстанции линии на единицу длины и времени.

Напряжение Q для распределительных и магистральных линий

Таблица 4

Распределительная линия	Магистральная линия	Q , кВ
Заземлённая траверса		900
Линия на деревянной опоре		2 700
	Однопроводная фаза	4 500
	Двухпроводная фаза	7 000
	В четыре расцеплённые фазы	11 000
	В 6 и 8 расцеплённые фазы	17 000

Согласно МЭК 60071-2 рекомендуется значение N_o учитывать в диапазоне 0,1-0,4 % в год. В распределительных сетях, удельное число простоя линии существенно больше, чем нормированное число отказов оборудования, поэтому параметром $L_{л}$ можно пренебречь.

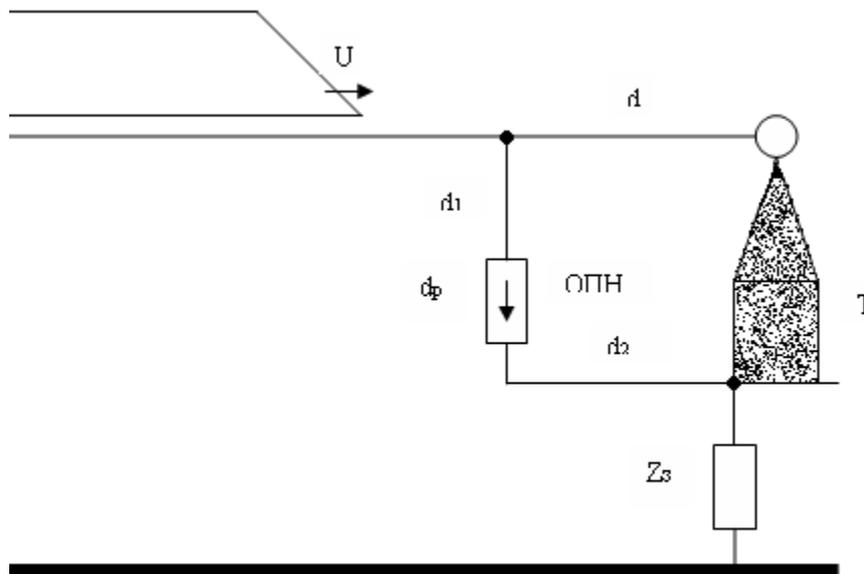


Рис. 6. Схема установки ОПН

Если известен нормированный защитный уровень оборудования (см. (9), то из (10) получаем длину защитной зоны $L_3 = L_c$:

$$L_3 = \frac{N}{Q} \left(\frac{U_{\text{в.имп}}}{1,15} - U_{\text{ост.г}} \right) (L_{\text{п}} + L_{\text{л}}) \quad (11)$$

Для оценки защитного расстояния рекомендуется принимать крутизну фронта, равной: 1550 кВ/мкс - при деревянных опорах, 800 кВ/мкс - при заземленных траверсах.

Приведенные величины по грозовой активности соответствуют условиям средневропейских регионов, где среднегодовое число прямых ударов молнии на 100 км линии составляет 25. При этом прорывы молнии с приведенной крутизной на подстанцию прогнозируются возможными один раз за 400 лет.

2.5.2. Остаточное напряжение при коммутационных перенапряжениях.

ОПН без искровых промежутков имеют существенные преимущества перед вентильными разрядниками в ограничении коммутационных перенапряжений, что является очень важной характеристикой при защите электрооборудования. При выборе защитного уровня коммутационных перенапряжений необходимо учитывать статистический разброс перенапряжений. Со снижением допустимого для объекта влияющего перенапряжения увеличивается риск повреждения изоляции при незначительном превышении напряжения. Для нивелирования такого эффекта предложено ввести корректирующий коэффициент ($K_{\text{к.к}}$), который зависит от соотношения между защитным уровнем ($U_{3,\text{к}}$) и перенапряжением, ожидаемым с 2 % частотой, $U_{3,2}$:

$$K_{\text{к.к}} = 1,24 - 0,2 \frac{U_{3,\text{к}}}{U_{3,2}}, \quad 0,7 < \frac{U_{3,\text{к}}}{U_{3,2}} \leq 1,2. \quad (12)$$

Соответственно, имеем следующую координацию между выдерживаемым для оборудования коммутационным перенапряжением, $U_{в.к}$, и защитным напряжением ОПН, $U_{ост.к} = U_{з.к}$:

$$U_{в.к} \geq K_{к.к} \times U_{ост.к}, \quad 1,0 < K_{к.к} \leq 1,1 \quad (13)$$

На практике, если частота возникновения коммутационных перенапряжений мала, то корректирующий коэффициент принимается равным 1, при большой частоте, для контактной сети - 1,1.

3. Общий алгоритм выбора ОПН. Корректировка параметров.

3.1. Выбор ОПН начинается по п. 2.1 и 2.2 с определения основных параметров ОПН: $U_{д}$, $U_{нор}$ - из условия обеспечения надежной работы при нормальном режиме эксплуатации; по п. 2.3 номинальные разрядные токи, $I_{н}$ - по номинальному напряжению сети и интенсивности грозовой деятельности.

3.2. Для установленных параметров $U_{д}$, $U_{нор}$ и $I_{н}$ проводится проверка устойчивости ОПН к абсорбции энергии по п. 2.4, начиная для ОПН с минимально допустимой $W_{аб}$ (табл. 2 или 3). В случае удовлетворения по данному критерию выбирается ОПН с большей величиной $W_{аб}$, что соответствует переходу на более высокий класс по разряду линии или по пропускной способности.

Если в характеристиках выбранного ОПН не приведена нормированная энергия абсорбции, то ее можно вычислить по соотношению:

$$W_{аб} = U_{ост.к} (U_{з.л} - U_{ост.к}) \frac{T_{п}}{Z} \quad (14)$$

где значения $U_{з.л}$; $T_{п}$; Z приведены в таблице.

Параметры для оценки энергии абсорбции.

Таблица 5

Номинальный ток ОПН, $I_{н}$, А	Класс линейного разряда	Волновое сопротивление линии, Z , Ом	Длительность прямоугольного импульса, $T_{п}$, мкс	Зарядное напряжение линии, $U_{з.л}$, кВ
10 000	1	$4,9U_{нор}$	2 000	$3,2U_{нор}$
10 000	2	$2,4U_{нор}$	2 000	$3,2U_{нор}$
10 000	3	$1,3U_{нор}$	2 400	$2,8U_{нор}$
20 000	4	$0,8U_{нор}$	2 800	$2,6U_{нор}$
20 000	5	$0,5U_{нор}$	3 200	$2,4U_{нор}$
$U_{нор}$ – нормированное напряжение ОПН, кВ				

3.3. После выполненной корректировки по п. 2.4 для принятых параметров U_d , $U_{нор}$ и I_n по п. 2.5 устанавливаются нормированные защитные характеристики ОПН: $U_{ост.г}$ и $U_{ост.к}$, которые координируются с выдерживаемым перенапряжением или с испытательными напряжениями защищаемого объекта. Переменными корректировки защитных характеристик ОПН могут быть рабочие параметры U_d , $U_{нор}$, а для импульсных перенапряжений, также и длина защитной зоны. Корректировка может идти как в сторону снижения, так и повышения ранее избранных как рабочих, так и защитных свойств ОПН.

3.4. Корпус ОПН по своим электрическим характеристикам должен соответствовать требованиям, которые предъявляются к линейным и подстанционным изоляторам с учетом особенностей материала диэлектрика. Не рекомендуется устанавливать ОПН в зоне загрязнения выше IV степени загрязнения (СЗ) атмосферы, потому что сильные загрязнения на поверхности ОПН могут привести к нежелательному увеличению неравномерности распределения потенциала вдоль нелинейных элементов и, соответственно, преждевременному выходу их из строя. В случае значительных загрязнений целесообразно проводить профилактическую очистку внешней поверхности корпуса.

3.5. ОПН должны иметь свидетельство об испытаниях на взрывобезопасность.

Удельная эффективная длина пути утечки внешней изоляции.

Таблица 6

Степень загрязнения по квалификации	Удельная поверхностная проводимость, χ , мкСм	Удельная эффективная длина пути утечки, λ_e , см/кВ	
		До 35 кВ включительно	110-750 кВ
ПУЭ			
1	5	1,90	1,60
2	10	2,35	2,00
3	20	3,00	2,50
4	30	3,50	3,10
5	50	4,20	3,70

4. Методика выбора ОПН.

Для удобства пользования методика расчета допустимых параметров выбираемого ОПН представлена для конкретных объектов контактной сети.

4.1. Расчет ОПН для постоянного тока.

4.1.1. Исходные данные защищаемого объекта.

Исходные данные линии:

$U_M = 3,3$ кВ - номинальное напряжение сети;

$U_{н.р} = 4$ кВ - наибольшее рабочее напряжение;

$U_{в.имп} = 100$ кВ - импульсное выдерживаемое напряжение изоляторов;

$C_{л} \leq 0,014$ мкФ / км - погонная емкость линии;

$L_{л} \approx (0,8 - 1,25)$ мГн / км - погонная индуктивность линии;

$Z_{w} = (225-300)$ Ом - волновое сопротивление линии;

$t \approx (60-100)$ - число грозových часов в году;

загрязнение - умеренное, IV СЗА;

наибольшее поперечное усилие - не более 300 Н.

Исходные данные схемы замещения тяговой подстанции:

$C_{е.л} \approx (0,03-0,05)$ мкФ - эквивалентная входная ёмкость при отсутствии сглаживающих фильтров;

$C_{е.ф} \approx (125-165)$ мкФ - эквивалентная входная ёмкость при наличии сглаживающих фильтров, определяется эквивалентной ёмкостью фильтра;

$U_{в.имп} = 12$ кВ - выдерживаемое перенапряжение грозового импульса вентильного агрегата;

$U_{в.ком} \leq 8$ кВ коммутационное выдерживаемое перенапряжение вентильного агрегата;

$L_{е.ф} \approx (5,0-7,5)$ мГн - эквивалентная индуктивность при наличии сглаживающих фильтров, определяется как сумма индуктивностей фильтра и сглаживающего реактора;

загрязнение - умеренное, IV СЗА;

наибольшее поперечное усилие - не более 300 Н.

Исходные данные питающего тягового трансформатора на 35 кВ типа ТМРУ-5600 (6200) / 35 на подстанции:

$L_{т} \approx (1,7 - 2,0)$ мГн - эквивалентная индуктивность тягового трансформатора, отнесённая к вторичной обмотке;

$C_{т} \approx (0,0015-0,002)$ мкФ - эквивалентная емкость тягового трансформатора;

$U_{в.имп} = 180$ кВ - допустимое перенапряжение грозового импульса;

$U_{в.ком} = 80 \times \sqrt{2} = 113$ кВ - допустимое перенапряжение коммутационного импульса, принятое как амплитудное значение одноминутного испытательного напряжения рабочей частоты;

загрязнение - умеренное, IV СЗА;

наибольшее поперечное усилие - не более 300 Н.

4.1.2. Установление границ допустимых параметров ОПН.

Приведенные данные линии и подстанции позволяют установить допустимые предельные значения характеристик ОПН для защиты сети и ее подходов к подстанции согласно критериям, изложенным в п. 2.1. Результаты расчетов представлены в таблице 7, в которой есть соответствующие ссылки использованных соотношений.

Таблица 7

Исходные данные объекта			Допустимые параметры ОПН		Критерии оценки: разделы и формулы
№ п/п	Наименование характеристик	Значение	Наименование характеристик	Значение	
Линия контактной сети					
1.	Номинальное напряжение сети	3,3 кВ	Номинальное напряжение, U_m	3,3 кВ	
2.	Наибольшее рабочее напряжение сети	4,0 кВ	Длительно допустимое напряжение, U_d	Не менее 4 кВ	2.1; (1)
3.	Кратковременные перенапряжения сети, до 10 с	4,2-4,5 кВ*	Нормированное напряжение, $U_{нор}$	Не менее** 4,2-4,5 кВ	2.2; (3); (4)
4.	Активность молнии	80-100 молниечасов	Номинальный разрядный ток, I_n , 8/20 мкс	10 кА	2.3; (5)
5.	Импульсное выдерживаемое напряжение изоляции сети	100 кВ	Остаточное напряжение при I_n , $U_{ост.г}$	Не более 100/1,15 = 87 кВ	2.5; (9)
6.	Энергия заряда сети с погонной ёмкостью 0,014 мкФ и при расчётной длине 100 км ***	0,11 кДж	Удельная энергия абсорбции ОПН для защиты линии, $W_{уд}$	Достаточно 1 кДж/кВ, ОПН класса 1, $I_{сил} = 65$ кА	2.4; (8)
Тяговая подстанция со стороны контактной сети 3,3 кВ					
7.	Предельно допустимое перенапряжение выпрямительного агрегата	$U_{в.имп} = 12$ кВ $U_{в.ком} = 9,0$ кВ	Защитные уровни ОПН:	$U_{ост.г} \leq 12$ кВ $U_{ост.к} \leq 9,0$ кВ	2.5
8.	Энергия заряда входной ёмкости тяговой 150дстанций с сглаживающим 150дстанц, 165 мкФ	12,8 кДж	Удельная энергия абсорбции ОПН на входе тяговой 150дстанций, $W_{уд}$	Не менее 12,8/3,3 \leq 4 кДж/кВ, ОПН класса 3	2.4; (8)
Тяговый трансформатор ТМРУ- 5600(6200)/35 со стороны питающей линии 35 кВ					
9.	Наибольшее рабочее напряжение	35 кВ	Длительно допустимое напряжение, U_d	Не менее 35 кВ	2.1; (1)

10.	Кратковременные перенапряжения сети, до 10 с	40,5 кВ*	Нормированное напряжение, $U_{\text{нор}}$	Не менее ** 40,5 кВ	2.2; (3); (4)
11.	Активность молнии	80-100 молниечасов	Номинальный разрядный ток, $I_{\text{н}}$, 8/20 мкс	10 кА	2.3; (5)
12.	Испытательное (допустимое) перенапряжение питающего оборудования тяговой подстанции	$U_{\text{в.имп}}=180\text{кВ}$ $U_{\text{в.ком}}=113\text{кВ}$	Защитные уровни ОПН:	$U_{\text{ост.г}} \leq 156,5\text{кВ}$ $U_{\text{ост-к}} \leq 102,7\text{кВ}$	2.5; (9), (13)
13.	Энергия заряда эквивалентной ёмкости тягового трансформатора, $C_{\text{э.тр}}=0,002\text{мкФ}$; + энергия заряда фазы ВЛ 35кВ с $C_{\text{л}}=0,005\text{мкФ/км}$ с расчётной длиной 100 км***	5,2 кДж	Удельная энергия абсорбции ОПН, $W_{\text{уд}}$	Достаточно 1 кДж/кВ, ОПН класса 1, $I_{\text{сил}}=65\text{ кА}$	2.4; (8)

Примечания к Таблице 7:

* - подлежит уточнению в каждом отдельном случае;

** - рекомендуется сверять устойчивость ОПН к кратковременным перенапряжениям на всем временном диапазоне, для чего потребовать от поставщика вольт / временные характеристики ОПН (см. рис.2);

*** - длина линии выбирается реальная.

4.2. Расчет ОПН для переменного тока.

4.2.1. Исходные данные защищаемого объекта.

Исходные данные линии:

$U_{\text{с}} = 27,5\text{ кВ}$ - номинальное напряжение сети;

$U_{\text{н.р}} = 30\text{ кВ}$ - наибольшее рабочее напряжение;

$U_{\text{в.имп}} \leq 245\text{ кВ}$ - импульсное выдерживаемое напряжение изоляторов;

$C_{\text{л}} \leq 0,014\text{ мкФ / км}$ - погонная ёмкость линии;

$L_{\text{л}} \approx (0,8 - 1,25)\text{ мГн / км}$ - погонная индуктивность линии;

$Z_{\text{w}} = (225-300)\text{ Ом}$ - волновое сопротивление линии;

$t \approx (60-100)$ - число грозových часов в году;

загрязнение - умеренное, IV СЗА;

наибольшее поперечное усилие - не более 300 Н.

Исходные данные питающего тягового трансформатора на 27,5 кВ типа ТДТНЭ 25000/110 на подстанции:

$L_T \approx (1,7 - 2,0)$ мГн - эквивалентная индуктивность тягового трансформатора, которая отнесена к вторичной обмотке;

$C_T \approx (0,0015-0,002)$ мкФ - эквивалентная ёмкость тягового трансформатора;

$U_{в.имп} = 170$ кВ - допустимое перенапряжение грозового импульса со стороны контактной сети;

$U_{в.ком} = 70 \times \sqrt{2} = 99,6$ кВ - допустимое перенапряжение коммутационного импульса, принимается как амплитудное значение одностороннего испытательного напряжения рабочей частоты;

загрязнение - умеренное, IV СЗА;

наибольшее поперечное усилие - не более 300 Н.

4.2.2. Установление границ допустимых параметров ОПН.

По аналогии с ОПН для сети постоянного тока определяем допустимые предельные значения характеристик защитных ОПН. Результаты расчетов представлены в таблице 8.

Таблица 8

Исходные данные объекта			Допустимые параметры ОПН		Критерий оценки: разделы и формулы
№ п/п	Наименование характеристик	Значение	Наименование характеристик	Значение	
Линия контактной сети					
1	Номинальное напряжение сети	27,5 кВ	Номинальное напряжение, U_M	27,5 кВ	
2	Наибольшее рабочее напряжение сети	30,0 кВ	Длительно допустимое напряжение, U_D	Не менее 30,0 кВ	2.1; (1)
3	Кратковременные перенапряжения сети, до 10 с	Не менее 37,5 кВ*	Нормированное напряжение, $U_{нор}$	Не менее** 37,5 кВ	2.2; (3); (4)
4	Активность молнии	80-100 молниечасов	Номинальный разрядный ток, I_n , 8/20 мкс	10 кА	2.3; (5)
5	Импульсное выдерживаемое напряжение изоляции сети	245 кВ	Остаточное напряжение при I_n , $U_{ост.г}$	Не более 245/1,15 = 213 кВ	2.5; (9)
6	Энергия заряда сети с погонной ёмкостью 0,014 мкФ и при расчётной длине 100км***	7,56 кДж	Удельная энергия абсорбции ОПН для защиты линии, $W_{уд}$	Достаточно 1 кДж/кВ, ОПН класса 1, $I_{сил} = 65$ кА	2.4; (8)

Тяговый трансформатор ТДТНЭ 25000/110 со стороны контактной сети 27,5кВ					
9	Наибольшее рабочее напряжение	30 кВ	Длительно допустимое напряжение, U_d	Не менее 30 кВ	2.1; (1)
10	Кратковременные Перенапряжения сети, до 10 с	37,5 кВ*	Нормированное напряжение, $U_{нор}$	Не менее** 37,5 кВ	2.2; (3); (4)
11	Активность молнии	80-100 молниечасов	Номинальный разрядный ток, I_n , 8/20 мкс	10 кА	2.3; (5)
12	Испытательное (допустимое) перенапряжение питающего оборудования тяговой подстанции	$U_{в.имп} = 170$ кВ $U_{в.ком} = 99,6$ кВ	Защитные уровни ОПН:	$U_{ост.г} \leq 147,8$ кВ $U_{зал.к} \leq 90,0$ кВ	2.5; (9), (13)
13	Энергия заряда эквивалентной ёмкости тягового трансформатора, $C_{э.тр} = 0,002$ мкФ; + энергия заряда фазы ВЛ 35кВ с $C_L = 0,014$ мкФ/км с расчётной длиной 100 км***	8,64 кДж	Удельная энергия абсорбции ОПН для защиты линии, $W_{уд}$	Достаточно 1 кДж/кВ, ОПН класса 1, $I_{сил} = 65$ кА	2.4; (8)

*, **, *** см. Примечания к таблице 7.

4.3. Примеры выбора ОПН, рекомендации по их применению.

4.3.1. Выбор ОПН для защиты фидеров.

Согласно данным расчета (см. таблицу 7, п.1-6) для защиты фидеров постоянного тока в полной мере удовлетворяет ОПН класса 1 по квалификации пропускной способности, приведенной в таблицах 4 и 5: $I_n = 10$ кА; $I_{н.с} = 65$ кА; $I_{пр} = 250-400$ А. При этом $U_d \geq 4$ кВ; $U_{нор} \geq 4,2$ кВ; $U_{ост.г} \leq 87$ кВ. Из предлагаемых на рынке ограничителей перенапряжения выбираем ОПН, наиболее соответствующим техническим требованиям и стоимости.

Целесообразно в первую очередь ОПН выбранного типа устанавливать вместо роговых разрядников на подходах тяговой подстанции контактной сети, на узловых участках сети, на отходящих линиях и на других ответственных участках линии.

4.3.2. Выбор ОПН для защиты тяговой подстанции с выпрямительными агрегатами.

В соответствии с п. 7-8 таблицы 7 нужен ОПН класса 3 с токовыми характеристиками: $I_n = 10$ кА; $I_{н.с} = 100$ кА; $I_{пр} = 750-1100$ А. При этом $U_d \geq 4$ кВ; $U_{нор} \geq 4,2$ кВ; $U_{ост.г} \leq 12$ кВ; $U_{ост.к} \leq 9,0$ кВ.

Выбранный ОПН значительно эффективнее выполняет защитную функцию по сравнению с применяемыми вентильными разрядниками при существенно больших токах.

4.3.3. Выбор ОПН для защиты питающего тягового трансформатора.

Из расчета параметров, приведенного в п. 9-13 таблицы 7 следует: класс пропускной способности - 1; $I_n = 10$ кА; $I_{н.с} = 65$ кА; $I_{пр} = 250-400$ А; $U_{ост.г} \leq 156,5$ кВ; $U_{ост.к} \leq 102,7$ кВ.

Выбираем ОПН-35 с прямоугольным током равным 400А.

На подстанциях, на которых предусмотрены повышенные меры защиты от прямого удара молний можно выбрать ОПН с меньшим номинальным током, $I_n = 5$ кА, например, ОПНп-35 с прямоугольным током на 300 А. Для данных ОПН расчетная максимальная длина защитной зоны, L_z , для случая с заземленной траверсой, составляет: 5,06 м; 3,38 м; 3,75 м соответственно. Собственная емкость трансформатора вызывает колебания входного напряжения, поэтому рекомендуется уменьшить расчетное защитное расстояние в 2,5 раза и более в зависимости от величины ёмкости.

При одной и той же защитной длине на эффективность защиты влияет также схема присоединения ОПН. Ниже на рис. 4 приведены варианты присоединения ОПН к защищаемому объекту - трансформатору. Вариант А - не рекомендуется; вариант Б - рекомендуется; вариант В - лучший.

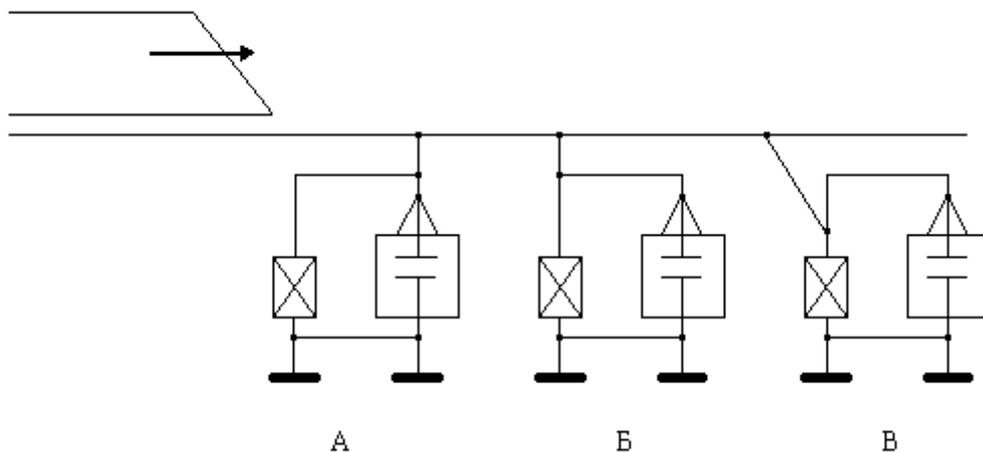


Рис. 7. Схема присоединения ОПН.

4.3.4. Выбор ОПН для защиты линий переменного тока.

Согласно данным расчета для линий переменного тока имеем: $I_n = 10$ кА; $I_{н.с} = 65$ кА; $I_{пр} = 250-400$ А; $U_d \geq 30$ кВ; $U_{нор} \geq 37,5$ кВ; $U_{ост.г} \leq 213$ кВ.

4.3.5. Выбор ОПН для защиты питающего тягового трансформатора со стороны контактной сети переменного тока.

Из таблицы 8 для тягового трансформатора ТДТНЭ 25000/110 имеем: класс пропускной способности - 1; $I_n = 10$ кА; $I_{н.с} = 65$ кА; $I_{пр} = 250-400$ А; $U_{ост.г} \leq 147,8$ кВ; $U_{ост.к} \leq 90,0$ кВ.

Выбор конкретного типа разрядника осуществляется в зависимости от нагрузки сети, от ресурса изоляции защищаемого трансформатора, от молниезащищенности подстанции и от других технических и экономических параметров (см. также п. 4.3.3).

4.3.6. Общие замечания по координации внешней изоляции ОПН и механической прочности.

Внешняя изоляция выбранных ОПН может эксплуатироваться в районе с IV-й степенью загрязнения атмосферы, проверяется сопоставлением длины пути утечки ОПН с минимально необходимой, $L_{\text{мин}}$:

$$L_{\text{мин}} = \lambda_e \times U_{\text{н.р}},$$

где $\lambda_e = 2,35$ см - удельная длина пути утечки (см. Таблицу 6);

$U_{\text{н.р}}$ - наибольшее рабочее напряжение.

Для рассмотренных примеров имеем $L_{\text{мин}}$: 106 и 952 мм для ОПН на 3,3 и 35 кВ соответственно.

В сетях средних классов напряжения ОПН подвергаются в основном изгибающей нагрузке, которая практически обусловлена натяжением провода. Высота ОПН для класса по напряжению сети 3,3 кВ не превышает 150 мм, а на 35 кВ - 750 мм, поэтому выбранные разрядники также удовлетворяют требованиям по механической прочности при заданном предельной нагрузке 300 Н, характерном для сетей среднего класса.