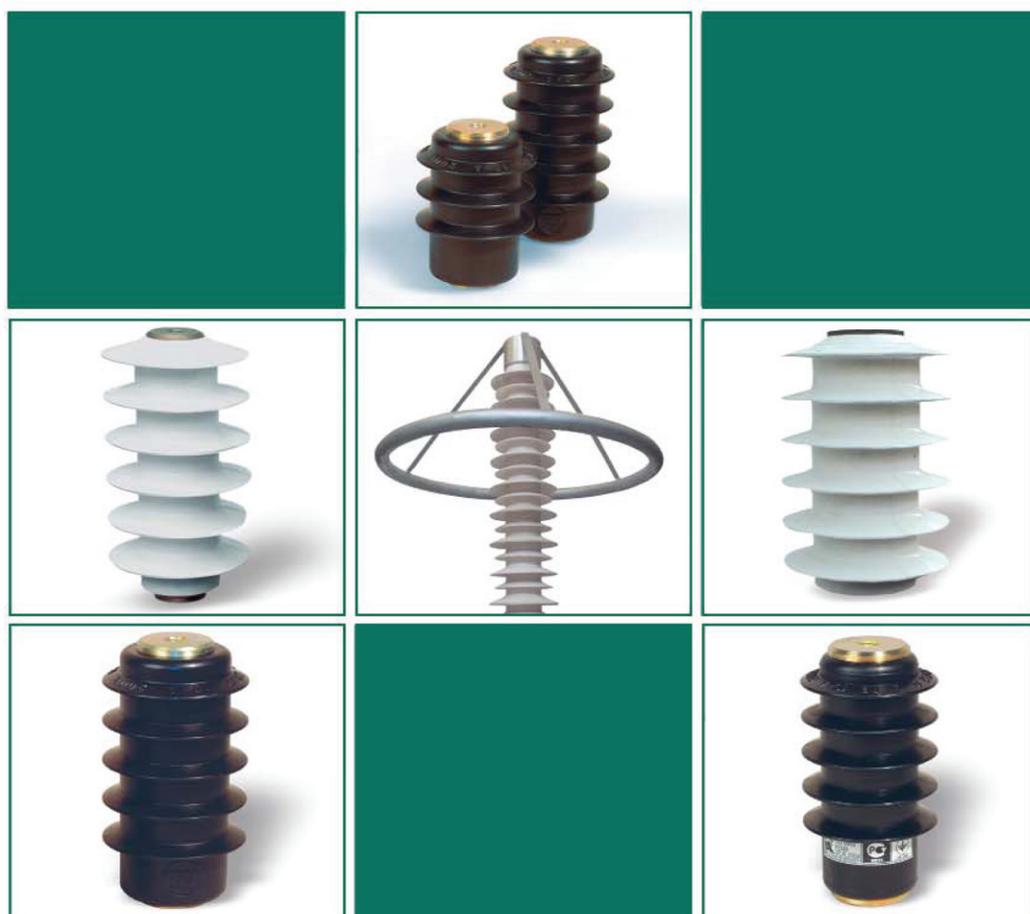


ПРИМЕНЕНИЕ ОПН В СЕТЯХ 6-35 кВ



Техническая информация

1.	Введение.....	2
2.	Общая характеристика сетей	2
2.1.	Характеристика уровней изоляции сетей 6-35 кВ	3
2.2.	Классификация и характеристика внутренних перенапряжений сетей 6-35 кВ.....	6
2.2.1.	Квазистационарные перенапряжения	6
2.2.2.	Коммутационные перенапряжения	7
2.2.2.1.	Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю	7
2.2.2.2.	Дуговые перенапряжения в сети с компенсацией токов замыкания на землю	9
2.2.2.3.	Дуговые перенапряжения в сети с резистивным заземлением нейтрали	9
2.2.2.4.	Перенапряжения при включение воздушных (ВЛ) и кабельных (КЛ) линий	9
2.2.2.5.	Отключение ненагруженных линий.....	10
2.2.2.6.	Отключение ненагруженных трансформаторов	10
2.2.2.7.	Отключение двойного замыкания на землю	11
2.2.2.8.	Отключение двухфазных коротких замыканий	11
2.2.2.9.	Включение электродвигателей через питающий кабель.....	11
2.2.2.10.	Отключение двигателей	12
2.2.2.11.	Перенапряжения при отключении двигателей вакуумными выключателями	13
3.	Ограничение перенапряжений.....	16
3.1.	Основные положения по выбору параметров ОПН.....	16
3.2.	Методика выбора основных параметров ОПН	17
3.2.1.	Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН... 18	
3.2.2.	Выбор номинального разрядного тока ОПН.....	20
3.2.3.	Определение защитного уровня ограничителя	21
3.2.3.1.	Определение защитного уровня ограничителя при грозовых перенапряжениях.....	21
3.2.3.2.	Места установки ОПН для защиты от грозовых перенапряжений.	22
3.2.3.3.	Определение защитного уровня ограничителя при коммутационных перенапряжениях.....	25
3.2.4.	Выбор энергоемкости ограничителя.....	26
3.2.5.	Выбор тока срабатывания взрывопредохранительного устройства.	27
3.2.6.	Выбор длины пути утечки внешней изоляции ограничителя.....	27
3.2.7.	Выбор типа ограничителя.	27
3.2.8.	Особенности выбора ОПН для защиты от коммутационных перенапряжений.	29
3.2.8.1.	Выбор параметров ограничителей для защиты сети СН электростанций от перенапряжений при дуговых замыканиях на землю.....	29
3.2.8.2.	Выбор параметров ОПН для защиты сети СН, работающей с изолированной нейтралью или нейтралью заземленной через ДГР.....	29
3.2.8.3.	Выбор параметров ОПН для защиты сети СН, работающей с нейтралью заземленной через резистор.	30
3.2.9.	Выбор ограничителя для защиты ГРУ от дуговых перенапряжений.	30
3.2.10.	Выбор параметров ОПН для защиты от перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями.....	31
3.3.	Место установки и монтаж ОПН.....	32

1. Введение.

Внедрение защитных аппаратов нового поколения сталкивается с значительными трудностями их правильного применения. В первую очередь это связано с недостаточностью нормативных документов регламентирующих правильное использование ОПН в сетях 6-35 кВ. Перед энергетическими предприятиями, как правило, возникают две взаимопротиворечащие друг другу задачи. С одной стороны глубоко ограничить перенапряжения, а с другой обеспечить надежную работу самого аппарата. Если приоритет, при выборе параметров ОПН, отдавать первой задаче, то снизится надежность работы ОПН. В обратном случае повышаются воздействия на изоляцию электрооборудования. Разрешению этой дилеммы посвящено настоящей руководство.

В руководстве кратко охарактеризованы основные виды перенапряжений. Необходимость появления этого материала связана с выработкой у читателя представления о различных видах перенапряжений, возникающих в распределительных и промышленных сетях. Понимание этой картины дает возможность правильно принимать решение о необходимости применения защитных устройств.

Значительное место уделено методике выбора аппарата. Основой данной методики является обеспечение высокой надежности аппарата с обеспечением необходимого защитного уровня изоляции электрооборудования. Даны рекомендации по защите электрооборудования электрических сетей различного назначения.

Автор надеется, что изложенный в руководстве материал позволит облегчить работу специалистов при выборе ОПН для электрических сетей 6-35 кВ.

2. Общая характеристика сетей.

Сети 6-35 кВ состоят из воздушных и кабельных линий электропередачи.

Электрооборудование сетей 6-35 кВ включает в себя коммутационные аппараты, измерительные трансформаторы тока и напряжения, силовые трансформаторы, генераторы, двигатели, синхронные компенсаторы, токоограничивающие и дугогасящие реакторы, конденсаторные батареи, устройства защиты от грозных и коммутационных перенапряжений.

Сети 6-35 кВ в большинстве случаев работают с изолированной или резонансно заземленной (заземленной через дугогасящий реактор) нейтралью. В ряде случаев, например, в сетях собственных нужд и генераторных сетях находит применение заземление нейтрали трансформаторов и генераторов через резистор (резистивное заземление нейтрали).

Для обоснованного выбора ОПН как основного средства защиты от перенапряжений необходимо представлять, с одной стороны, уровень изоляции оборудования 6-35 кВ, а с другой стороны – уровень грозовых и внутренних перенапряжений в этих сетях

2.1. Характеристика уровней изоляции сетей 6-35 кВ.

В соответствии с условиями эксплуатации изоляция конструкций подразделяется на внешнюю и внутреннюю. Внешней изоляцией называется внешняя часть изоляционной конструкции, где изолирующей средой является атмосферный воздух или сочетание поверхности диэлектрика с атмосферным воздухом.

Внутренней изоляцией называется внутренняя часть изоляционной конструкции, где изолирующей средой является жидкий, твердый или газообразный диэлектрик или их комбинация, не подвергающаяся непосредственному воздействию внешних условий.

Отличительной особенностью внешней изоляции является ее свойство восстанавливать свои параметры после разряда или пробоя, что дает возможность достаточно достоверно определить ее электрическую прочность.

Достоверных сведений о характеристиках электрической прочности внутренней изоляции получить не возможно. Поэтому они косвенно характеризуются нормированными (ГОСТ 1516.3) испытательными напряжениями грозовых импульсов и нормированным испытательным напряжением промышленной частоты. Для электрооборудования 6-35 кВ допустимая кратность (выдерживаемый уровень) коммутационных перенапряжений по отношению к фазному значению наибольшего рабочего напряжения определяется по выражению:

$$K_{\text{доп.вн}} = K_{\text{и}} K_{\text{к}} U_{\text{исп.вн}} * 1.73 / U_{\text{н.р.}} \quad (1)$$

$U_{\text{исп.вн}}$ - нормированное одноминутное испытательное напряжение промышленной частоты главной изоляции электрооборудования, кВ, (действующее значение);

$K_{\text{и}}$ – коэффициент импульса, учитывающий повышение разрядного напряжения изоляции при более коротком коммутационном импульсе по сравнению с испытательным напряжением. $K_{\text{и}}=1.3$ для главной изоляции трансформаторов. $K_{\text{и}}=1.1$ – для аппаратов;

$K_{\text{к}}$ – коэффициент кумулятивности, учитывающий снижение электрической прочности в условиях эксплуатации при многократных воздействиях перенапряжений и возможность старения изоляции. $K_{\text{к}}=0.9$ для главной изоляции трансформаторов. $K_{\text{к}}=1.0$ – для аппаратов;

$U_{\text{н.р.}}$ - наибольшее рабочее напряжение сети (действующее значение).

Допустимая кратность грозовых перенапряжений оценивается по формуле:

$$K_{\text{доп.гр.}} = 1.1(U_{\text{исп.гр.}} - U_{\text{ном}}) * \sqrt{3} / \sqrt{2} U_{\text{н.р.}} \quad (2)$$

$U_{исп.гр}$ - испытательное напряжение грозовым импульсом по ГОСТ 1516.1

Статорные обмотки электрических машин имеют меньший уровень изоляции. Особенностью статорной изоляции является то, что ее коэффициент импульса примерно равен единице. Если в сетях установлены высоковольтные электрические машины в виде синхронных компенсаторов, генераторов и электродвигателей, то $K_{доп}$ определяется как:

$$K_{доп.вн}=U_{исп. дв} * 1.73/U_{н.р. дв} , \quad (3)$$

где $U_{исп. дв}=2*U_{ном}+1$ – испытательное напряжение электрических двигателей.

Результаты расчетов для сетей 6-35 кВ представлены в таблицах

Таблица 1.

Допустимые кратности внутренних перенапряжений для внутренней изоляции трансформаторов 6-35 кВ с нормальной изоляцией.

U _{ном} , кВ	6	10	15	20	35
U _{н.раб} , кВ	6.9	11.5	17.5	23	40.5
U _{исп} , кВ	25	35	45	55	85
U _{доп} , кВ	41.5	57.9	74.5	91	140.6
K _{доп}	7.0	5.9	5.2	4.6	4.3

Таблица 2.

Допустимые кратности внутренних перенапряжений для электрооборудования 6-35 кВ с облегченной изоляцией.

U _{ном} , кВ	6	10	15	20
U _{н.раб} , кВ	6.9	11.5	17.5	23
U _{исп} , кВ	16	24	37	50
U _{доп} , кВ	26.5	39.7	61.2	82.7
K _{доп}	4.5	4.1	4.3	4.2

Таблица 3.

Допустимые кратности внутренних перенапряжений для электродвигателей 6-10 кВ

U _{ном} , кВ	6	10
U _{н.раб} , кВ	6.6	11
U _{исп} , кВ	13	21
K _{доп}	3.4	3.3

Таблица 4.

Допустимые кратности грозовых перенапряжений для внутренней изоляции трансформаторов 6-35 кВ с нормальной изоляцией.

Uном, кВ	6	10	15	20	35
Uн.раб, кВ	6.9	11.5	17.5	23	40.5
Uисп, , максимальное значение, кВ	60	80	108	130	200
Uдоп, максимальное значение, кВ	62.5	82	110	131	200
Kдоп	11	8.8	7.6	6.9	5.9

В заключении по допустимому уровню электрической прочности изоляции электрооборудования можно сделать следующие выводы.

1. Среди всех видов электрооборудования наименьший уровень изоляции имеют электрические машины.
2. Кратность допустимых уровней перенапряжений находится в пределах 4.0-7.0
3. Кратность допустимых грозовых перенапряжений при прочих равных условиях приблизительно на 45% больше, чем при внутренних перенапряжениях
4. Электрооборудование с облегченной изоляцией, применяемая в сетях 6-10 кВ, имеет кратность допустимых перенапряжений на 30% ниже, чем для электрооборудования с нормальной изоляцией.
5. В составе электрооборудования сетей 6-35 применяются трансформаторы тока, напряжения, выключатели, силовые трансформаторы, электродвигатели, синхронные компенсаторы и другое оборудование. Поэтому в большинстве случаев уровень изоляции линий определяется изоляцией перечисленных видов оборудования.

Приведенные данные показывают, что в сетях 6-35 кВ с изолированной или резонансно заземленной нейтралью внутренние перенапряжения обычно не опасны для изоляции электрооборудования с нормальной изоляцией. Вместе с тем нельзя исключить ухудшение (например старение) изоляции в периоды между эксплуатационными профилактическими испытаниями, поэтому для повышения надежности работы изоляции сетей, прежде всего состаренной в процессе многолетней эксплуатации, предусматривать дополнительные мероприятия по ограничению внутренних перенапряжений.

2.2. Классификация и характеристика внутренних перенапряжений сетей 6-35 кВ.

Основной особенностью сетей 6-35 кВ является изолированный или резонансно заземленный режим работы нейтрали. Именно это обстоятельство вызывает появление значительных уровней перенапряжений в данных сетях. В большинстве случаев сети работают с изолированной нейтралью. Если величина емкостного тока сети превышает нормированного значения: 30 А для сетей 6 кВ, 20 А для сетей 10 кВ и 10 А для сетей 35 кВ, нейтраль электрической сети заземляется через дугогасящий реактор. Сети с изолированной и резонансно заземленной нейтралью могут длительно работать с однофазным замыканием на землю (ОЗЗ). При ОЗЗ линейные напряжения в сети не искажаются, что позволяет не отключать поврежденный участок сети и тем самым не отключать потребителей электрической энергии. В месте замыкания горит дуга. В большинстве случаев она носит не устойчивый характер, что приводит к возникновению коммутационных перенапряжений.

В последнее время все большее распространение получает заземление нейтрали через резистор. Величина резистора подбирается таким образом, чтобы величина активного тока замыкания на землю была соизмерима с емкостной составляющей, обусловленной емкостью сети. Для сетей с небольшими емкостными токами величина резистора, как правило, более 100 Ом. Это заземление носит название высокоомного резистивного заземления. Наличие активного сопротивления в нейтрали сети приводит к стеканию избыточного заряда, накапливаемого на фазных емкостях сети в результате неустойчивого горения дуги. Смещение нейтрали сети в этом случае значительно меньше, а значит меньше и перенапряжения при ОЗЗ.

Внутренние перенапряжения сетей 6-35 кВ подразделяются на два вида:

- квазистационарные перенапряжения, которые возникают при неблагоприятных сочетаниях реактивных элементов сети и ЭДС источников питания. Эти перенапряжения имеют длительный характер и существуют до тех пор, пока не исчезнет причина их возникновения.

- Коммутационные перенапряжения, которые возникают при различных коммутациях электрической цепи. В реальных условиях под ними понимают все плановые и аварийные коммутации.

2.2.1. Квазистационарные перенапряжения.

Резонансное смещение нейтрали в сети с дугогасящим реактором.

Нормальная работа сети с изолированной нейтралью характеризуется наличием на нейтрали некоторого напряжения, называемого напряжением несимметрии. Это напряжение воз-

никает при наличии несимметрии в емкостях отдельных фаз сети или при различной величине проводимостей фаз, обусловленных, например, неодинаковой степенью загрязнения.

Например в сети с изолированной нейтралью у нетранспонированной ВЛ 35кВ на П-образных деревянных опорах с горизонтальным расположением проводов при междуфазном расстоянии 3м емкости крайних фаз относительно земли на 10% больше емкости среднего провода. В этом случае может произойти смещение нейтрали примерно на 0.7 кВ

Для сетей заземленных через дугогасящую катушку емкостной ток несимметрии протекает через индуктивность катушки. В этом случае может происходить резонансное смещение нейтрали превышающее обычное смещение, но не более чем в 20 раз.

Повышения напряжения в сетях 6-35 кВ при неполнофазных режимах работы сети.

Резонансные повышения напряжения могут возникать не только при естественной несимметрии емкостей фаз, но и при значительной несимметрии емкостей, вызванной обрывом проводов и неполнофазными включениями линий. Предел повышения напряжения определяется насыщением магнитопровода дугогасящего реактора.

В сети без дугогасящего реактора нарушение симметрии сети, вызываемое обрывом проводов с заземлением и без заземления, одновременным включением и отключением фаз возможны перенапряжения, обусловленные так называемым «опрокидыванием» фазы трансформатора. Перенапряжения на емкости линии при этом явлении могут достигать $4U_{\phi}$. Явление опрокидывания возникает лишь на линиях определенной длины и слабо загруженных трансформаторах.

2.2.2. Коммутационные перенапряжения.

2.2.2.1. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю.

Дуговые замыкания на землю являются самым распространенным видом повреждения в сетях 6-35 кВ. Нарушение изоляции в любой точке сети вызывает замыкание на землю. Характер замыкания может быть различен и зависит от условий в месте замыкания, величины емкостного тока и параметров сети. На практике замыкания делят на три вида: металлическое замыкание, через устойчивую дугу, через перемежающуюся дугу. В случае устойчивого горения дуги в месте замыкания, как и в случае металлического замыкания, кратность перенапряжений невелика ($2.4U_{\phi}$). Она обусловлена переходным процессом в момент замыкания.

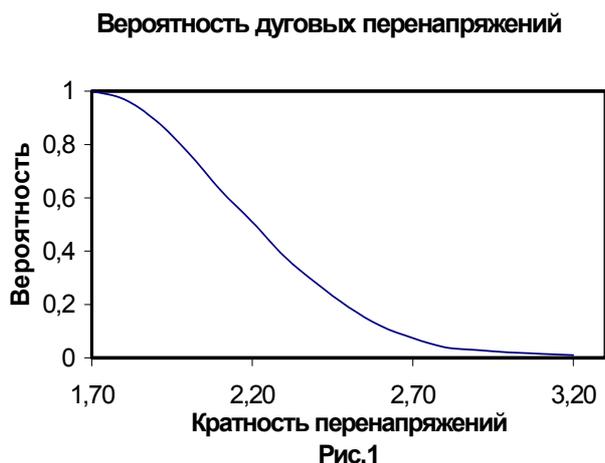
Перемежающаяся дуга является своего рода коммутатором, замыкания и размыкания которого приводят к перенапряжениям. Сущность образования перенапряжений в сети с изолированной нейтралью заключается в том, что после погасания дуги на неповрежденных фазах остаются заряды, которые, распределяясь по всей сети поднимают ее потенциал

относительно земли. На этот повышенный потенциал накладывается рабочее напряжение. В результате на поврежденной фазе получается повышение напряжения, которое вызывает повторное зажигание дуги.

Максимальная величина перенапряжений может достигать до $3.2U_{\phi}$, однако это возникает редко, поскольку требует совпадения ряда условий (Открытая дуга при сильном ветре, дуга в масле, дуга в узкой щели). Длительность предельных перенапряжений (как правило не более 2-3 с) также ограничена, потому что после серии последовательных за-

жиганий дуга или окончательно обрывается, либо, прожигая изоляцию переходит в устойчивую.

Максимальные кратности перенапряжений практически не зависят от номинального напряжения сети и величины емкостного тока. Вероятность появления заданной величины кратности перенапряжений представлена на рис.1.



Характерными особенностями пе-

ренапряжений при перемежающейся дуге являются их значительная длительность по сравнению с другими видами коммутационных перенапряжений, а также то, что они охватывают всю сеть данного напряжения.

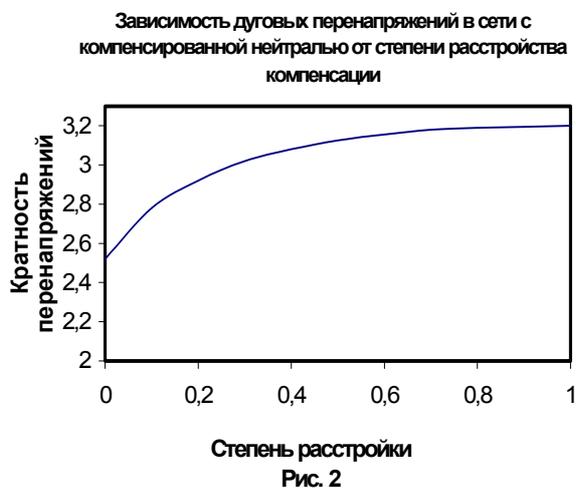
В сетях с изолированной нейтралью данный вид перенапряжений не представляет опасности для оборудования с нормальной изоляцией. Для вращающихся машин уровень дуговых перенапряжений лежит выше профилактических эксплуатационных, но ниже заводских испытательных. Поэтому возможны повреждения машин при дуговых замыканиях.

Косинусные конденсаторы, соединенные, как правило, в треугольник или звезду с изолированной нейтральной точкой, увеличивают междуфазную емкость и тем самым снижают уровень перенапряжений.

Наличие в сети токоограничивающих реакторов (особенно сдвоенных) вызывает увеличение значений перенапряжений при дуговых замыканиях. Это обусловлено протеканием емкостных токов сети к месту замыкания через индуктивность реактора. Увеличение значений перенапряжений зависит от емкости сети и мощности токоограничивающих реакторов и в среднем 20-30% больше, чем без реакторов.

2.2.2.2. Дуговые перенапряжения в сети с компенсацией токов замыкания на землю.

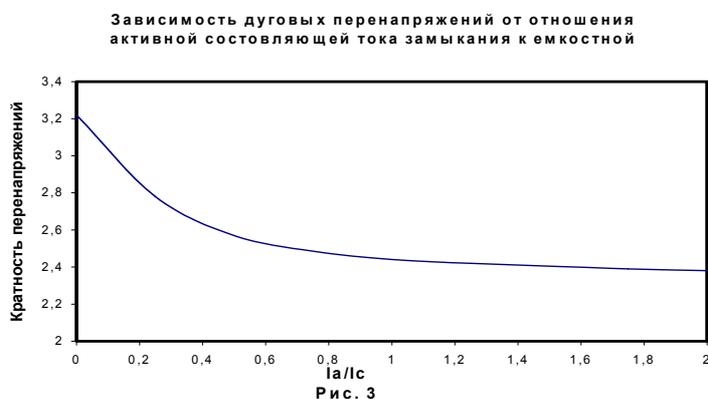
Для снижения вероятности возникновения короткого замыкания в месте однофазного повреждения рекомендуется ограничивать уровень емкостных токов замыкания на землю путем установки в нейтрали трансформаторов специально настроенных индуктивностей (ДГК). Последние позволяют одновременно снизить уровень дуговых перенапряжений. Полная компенсация емкостных токов снижает уровень перенапряжений до значения 2.6. В случае расстройки ДГР уровень перенапряжений повышается. Зависимость кратности перенапряжений для сетей 6-35 кВ от степени расстройки показана на рис.2.



Зависимость кратности перенапряжений для сетей 6-35 кВ от степени расстройки показана на рис.2.

2.2.2.3. Дуговые перенапряжения в сети с резистивным заземлением нейтрали.

Заземление нейтрали через активное сопротивление разряжает емкость сети в промежутке между гашениями и зажиганиями перемежающейся дуги, способствуя снижению величины дуговых перенапряжения. Предельное снижение перенапряжений практически наступает при



равенстве активной и емкостной составляющей тока в месте замыкания. Правильный выбор высокоомного заземления нейтрали снижает перенапряжения до величины $2.4-2.6U_{\phi}$. Зависимость дуговых перенапряжений от величины активного тока сети представлена на рис 3.

2.2.2.4. Перенапряжения при включение воздушных (ВЛ) и кабельных (КЛ) линий.

При включении ВЛ и КЛ в нормальном симметричном режиме перенапряжения не превышают $2U_{\phi}$. При наличии в сети ОЗЗ в процессе поиска «земли» перенапряжения увеличиваются и могут достигать $(5-6)U_{\phi}$, поскольку переходной процесс при включении накладывается на повышенный потенциал сети, обусловленный ОЗЗ. Процесс включения ВЛ или КЛ при ОЗЗ часто является причиной двойных замыканий на землю.

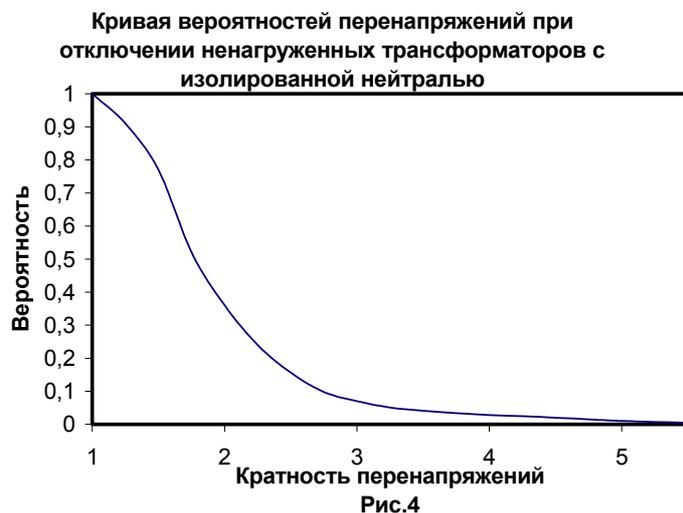
2.2.2.5. Отключение ненагруженных линий.

В сетях с изолированной нейтралью при отключении ненагруженных линий вследствие того, что потенциал нейтрали не фиксирован, возрастает влияние одной фазы на другие и возникают большие перенапряжения. Это способствует более высокому значению восстанавливающегося напряжения на межконтактном промежутке коммутационного аппарата. В результате могут создаваться условия для повторных пробоев промежутка (характерно для аппаратов с низкой скоростью движения контактов), что в свою очередь увеличивает перенапряжения.

Экспериментальные данные показывают, что при отключении ненагруженных линий масляными выключателями перенапряжения в 2% случаев достигают $4.5U_{\phi}$; перенапряжения превышающие $3U_{\phi}$ составляют примерно 7%.

2.2.2.6. Отключение ненагруженных трансформаторов.

При отключении ненагруженных трансформаторов с изолированной нейтралью возможность появления напряжения смещения нейтрали приводит к возрастанию перенапряжений. Были замерены перенапряжения до $5U_{\phi}$. В 2% случаев перенапряжения превышают $5U_{\phi}$. Перенапряжения могут быть оценены по кривой Рис. 4, которая получена при отключении ненагруженных трансформаторов 6-110 кВ с изолированной нейтралью масляными и воздушными вы-



ключателями. Кратность перенапряжений на вторичной стороне отключаемого трансформатора имеет примерно ту же величину, что и на первичной.

Наибольшие перенапряжения возникают при отключении ненагруженного трансформатора сразу после его включения, когда ток намагничивания не достиг установившегося значения.

В некоторых случаях могут быть опасны перенапряжения, связанные с перегоранием токограничивающих плавких вставок, если конструкция вставки недостаточно ограничивает перенапряжения.

Всплески перенапряжений при отключении малых индуктивных токов имеют длительность порядка сотен микросекунд и по своему характеру близки к грозовым и без труда снижаются ограничителями перенапряжений. На амплитуду перенапряжений ока-

зывает влияние мощность отключаемого трансформатора и емкость элементов сети подключенных к зажимам трансформатора. Первая увеличивает перенапряжения, вторая снижает. Электрофизические свойства коммутационного аппарата практически не влияют на величину перенапряжений.

2.2.2.7. Отключение двойного замыкания на землю.

При отключении короткого замыкания на землю в двух разных точках сети вследствие разновременной работы выключателей могут возникнуть перенапряжения. Они образуются на первой отключившейся фазе, когда в переходном процессе напряжение меняется от нуля (фаза заземлена) до мгновенного значения линейного напряжения. Максимальные перенапряжения составляют примерно $3.3U_{\phi}$.

2.2.2.8. Отключение двухфазных коротких замыканий.

В целом ряде схем 6-35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью при отключении двухфазных коротких замыканий возникают перенапряжения, связанные с тем, что в момент обрыва выключателем тока к.з. при его нулевом значении одновременно обрывается вблизи своего максимума ток намагничивания трансформатора либо ток дугогасящего реактора. Высвобождающаяся магнитная энергия заряжает емкости сети и вызывает перенапряжения.

Для создания перенапряжения необходимо, чтобы трансформатор был ненагруженным. Перенапряжения тем больше, чем меньше емкость, оставшаяся у трансформатора.

2.2.2.9. Включение электродвигателей через питающий кабель.

При включении первой фазы двигателя напряжение на емкостях, не включившихся фаз двигателя устанавливается через индуктивность двигателя в процессе свободных колебаний системы «кабель-двигатель», частота которых обычно находится в диапазоне 50-300 кГц, а амплитуда $1.8-2.0U_{\phi}$. Включение второй и третьей фазы отличается от включения первой наличием начального потенциала на емкостях включаемых фаз. Включение второй фазы с запаздыванием на полпериода собственной частоты колебаний приводит к появлению перенапряжений на уровне $3.3U_{\phi}$.

Если коммутации второй и третьей фаз выключателя происходят после затухания свободных колебаний системы «кабель-двигатель», то перенапряжения составляют $(2.6-2.7)U_{\phi}$.

При включении очень мощных двигателей (1000 кВ и более) кратности перенапряжений снижаются.

Существенное влияние на величину перенапряжений оказывает длина кабеля и емкость фазы двигателя. С ростом длины кабеля возрастает активное сопротивление и как

следствие увеличивается демпфирование свободной составляющей переходного процесса. Это в свою очередь приводит к снижению перенапряжений. Максимальные перенапряжения имеют малую вероятность, поскольку требуют совпадения большого числа факторов. Реальный разброс во времени включения фаз приводит к малой вероятности максимальных перенапряжений. Следует отметить, что чем больше временной разброс во включении фаз, тем больше вероятность возникновения максимальных перенапряжений.

В процессе поиска «земли» в сети возможны частые включения и отключения электродвигателей в сеть с заземленной фазой. Если первой к двигателю через кабель подключается неповрежденная фаза сети, то максимальные перенапряжения на этой фазе могут достигать $3.4U_{\phi}$. Если в сети существовала перемежающая дуга, перенапряжения могут составить $(5-6)U_{\phi}$. Включение второй фазы вызывает меньшие перенапряжения – до $2.7U_{\phi}$.

Включение двигателя в процессе АВР или АПВ при несинхронном остаточном напряжении двигателя повышает возможные перенапряжения по сравнению с обычным включением до уровня $(4.0-4.5)U_{\phi}$. Образование перенапряжений аналогично, описанным выше. Разница заключается в начальных условиях. Величина перенапряжений существенно зависит от остаточного напряжения двигателя в момент коммутации. После отключения двигателя от сети напряжение на нем уменьшается постепенно, поскольку магнитный поток двигателя поддерживается за счет токов, индуцируемых в контурах ротора в момент включения. Поскольку двигатель продолжает вращаться за счет запасенной механической энергии, в его обмотках генерируется напряжение. Это напряжение уменьшается вследствие затухания индуцируемых токов и снижения скорости вращения электродвигателя. Процесс снижения напряжения зависит от параметров электродвигателей. Время, за которое напряжение снижается до 0.4 начального значения, колеблется от 0.5 до 2 с.

Величина паузы АПВ определяется свойствами коммутационного аппарата и устройствами релейной защиты. Для сетей 6-10 кВ это время не менее 0.5 с. Поэтому через 0.5 с на двигателе остается напряжение 0.4-0.7 начального значения и максимальное значение перенапряжений при АПВ не превосходит $4U_{\phi}$.

2.2.2.10. Отключение двигателей.

Перенапряжения при отключении высоковольтных асинхронных электродвигателей связаны с особенностями работы дугогасящих камер (срез тока и повторные пробои в межконтактном промежутке).

При отключении вращающегося двигателя после отделения его от сети главный магнитный поток, связывающий обмотки статора и ротора, в первый момент остается неизменным, так как поддерживается током в роторе. Этот ток затухает достаточно

медленно. Поэтому некоторое время после отключения на зажимах двигателя поддерживается нормальное синусоидальное напряжение. Время поддержания этого процесса зависит от момента инерции ротора. Энергия, запасенная в полях рассеивания статора колебательным образом переходит в емкость фаз двигателя и присоединенного кабеля. Наложение этих двух процессов дает результирующее напряжение на зажимах двигателя.

Отключение вращающегося короткозамкнутого двигателя (холостого или с номинальной нагрузкой) дает обычно умеренные перенапряжения, так как магнитная энергия главного поля исчезает не сразу, а постепенно расходуясь на нагрев обмотки ротора. Перенапряжения возникают за счет относительно небольшой энергии полей рассеяния статора.

Отключение вращающегося двигателя с замкнутой накоротко цепью ротора соответствует обычному отключению двигателя с фазным ротором при нормальном режиме работы.

Если двигатель, имеющий фазный ротор, отключается из вращающегося состояния при введенном пусковом сопротивлении, то главный магнитный поток спадает быстро и индуцирует в статоре напряжение выше нормального. Величина напряжения может значительно превосходить U_{ϕ} (по опытным данным 4-5 U_{ϕ}). Отключение асинхронного двигателя с разомкнутой обмоткой опасно отключать выключателем любого типа.

Отключение вращающегося двигателя не дает перенапряжений выше двойного линейного. При нагруженном двигателе перенапряжения немного больше, чем при холостом ходе.

Наиболее опасно отключение неподвижного двигателя. В особо неблагоприятных условиях были отмечены перенапряжения до $6U_{\phi}$ и более.

2.2.2.11. Перенапряжения при отключении двигателей вакуумными выключателями.

Источником опасных воздействий, сопровождающих процесс отключения, является срез тока в вакуумной камере до его естественного перехода через нулевое значение. При этом магнитная энергия, запасенная в индуктивности нагрузки, колебательным образом переходит в собственную емкость нагрузки и кабеля присоединения. Кратность, возникающих, перенапряжений зависит от соотношения индуктивности и емкости отключаемого присоединения. У двигателей 6-10 кВ индуктивность имеет относительно небольшое значение (менее 100 мГн), запасенная в ней энергия в момент среза тока невелика и выделение ее в емкость присоединения не приводит к опасным перенапряжениям. Амплитуда переходной составляющей напряжения определяется в основном разностью между напряжением на двигателе до отключения и величиной смещения нейтрали, вызванного отключением, и практически не зависит от тока среза.

После среза тока промышленной частоты напряжение в отключаемой фазе на стороне секции шин остается практически неизменным за счет большого числа присоединений и примерно равным амплитудному значению фазного рабочего напряжения. Напряжение на полюсе отключаемой фазы выключателя со стороны присоединения изменяется в соответствии с переходным процессом, вызванным перезарядом емкости присоединения и рассеянием индуктивной энергии двигателя. Разность потенциалов на контактах выключателя носит название переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН). Если ПВН в некоторый момент времени превышает значение электрической прочности промежутка между расходящимися контактами выключателя, то происходит повторное зажигание дуги. При этом в кабеле отключаемого присоединения возбуждается волна напряжения, перезаряжающая его до потенциала, под которым находится секция шин. Амплитуда этой волны определяется разностью между напряжением сети и напряжением на двигателе до ПЗ. Приходя на двигатель эта волна испытывает отражение, близкое по характеру к отражению от холостого конца кабеля, что приводит к удвоению амплитуды волны на зажимах двигателя. Это объясняется тем, что постоянная времени контура «волновое сопротивление кабеля - индуктивность двигателя» составляет доли секунды и индуктивность практически не участвует в волновом процессе. Наличие собственной емкости двигателя приводит к затягиванию фронта набегающей волны за счет перезарядки емкости через волновое сопротивление кабеля. Постоянная времени перезарядки для кабелей и двигателей не превышает 1 мкс. Перепад напряжения на двигателе за столь короткое время, равный удвоенному значению волны напряжения, представляет опасность для продольной (межвитковой) изоляции двигателя и требует рассмотрения при выборе защитных устройств.

Частота высокочастотных колебаний, вызванных пробегами волн в кабеле после ПЗ, определяется длиной кабеля, и при длинах, меньших 1 км, превышает 50 кГц. Отличительной особенностью вакуумного выключателя является его способность к отключению высокочастотного тока этих колебаний при переходе его через нулевое значение. После такого отключения возобновляется процесс восстановления напряжения на контактах выключателя, однако уже при иных начальных условиях. Напряжение на емкости двигателя и ток в его индуктивности в момент отключения больше, чем при первом отключении. Это приводит к тому, что максимум в кривой ПВН становится больше; возможно новое зажигание дуги. Возрастание максимума кривой ПВН объясняет тот факт, что уровень перенапряжений при ПЗ на присоединениях с двигательной нагрузкой значительно выше, чем при одиночном срезе тока промышленной частоты, и тем больше, чем больше число ПЗ. Так, например, для двигателя, мощностью 630 кВт, при длине кабеля 80 м, кратность

перенапряжений при одиночном срезе тока 5 А по расчетам составляет 1.77, а при возникновении повторных зажиганий достигает 6-кратной величины.

Для сравнения уровней внутренних перенапряжений с уровнем изоляции электрооборудования все виды перенапряжений сведены в таблицу 5.

Таблица 5.

Характеристика внутренних перенапряжений (сети с изолированной и резонансно заземленной нейтралью).

№	Вид перенапряжений	Кратность перенапряжений*
1	Дуговые замыкания на землю (изолированная нейтраль)	3.0-3.5
2	Дуговые замыкания на землю (резонансно заземленная нейтраль)	2.6
3	Дуговые замыкания на землю (резистивно заземленная нейтраль)	2.4-2.6
4	Поиск «земли» при ОЗЗ	4.0-6.0
5	Резонансные перенапряжения	до 4.0
6	Включение электродвигателей	2.6-3.3
7	Включение электродвигателей при наличии в сети ОЗЗ	3.4
8	АПВ и АВР электродвигателей	4.0-4.5
9	Включение ВЛ и КЛ при наличии в сети ОЗЗ	3.0-3.5
10	Отключение ненагруженных ВЛ и КЛ	3.0-4.5
11	Отключение ненагруженных трансформаторов	5.0-6.0
12	Отключение двойного замыкания на землю	3.3
13	Отключение вращающихся электродвигателей	4.0-5.0
14	Отключение заторможенных электродвигателей	5.0-6.0

* - Кратность перенапряжений определяется по отношению к амплитуде фазного напряжения сети.

Сравнение допустимых уровней изоляции оборудования и кратностей внутренних перенапряжений показывает, что большинство перенапряжений не опасно для оборудования с нормальной изоляцией. В связи с этим это оборудование требует защиты только от

грозовых перенапряжений. При этом важно, чтобы квазистационарные перенапряжения, имеющие длительный характер не приводили к выходу из строя ограничителей перенапряжений. Для оборудования с облегченной изоляцией, вращающихся машин и состарившейся изоляцией в процессе эксплуатации представленные выше уровни перенапряжений превышают допустимый уровень воздействий. Следовательно, для повышения надежности эксплуатации данного вида оборудования в электрических сетях необходимо установка защитных средств (ОПН).

3. Ограничение перенапряжений

3.1. Основные положения по выбору параметров ОПН.

К основным выбираемым параметрам ограничителя относятся:

- **наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН ($U_{НР}$)** - наибольшее действующее значение напряжения промышленной частоты, которое может быть приложено непрерывно к ОПН в течение всего его срока службы, и не приводит к повреждению или термической неустойчивости ОПН при нормированных воздействиях;
- **номинальный разрядный ток ОПН (I_n)** - максимальное (амплитудное) значение грозового импульса тока 8/20 мкс, используемое для классификации ОПН;
- **удельная энергия** - рассеиваемая ограничителем энергия, полученная им при приложении одного импульса тока пропускной способности, в долях наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения;
- **ток пропускной способности ОПН ($I_{ПР}$)** - максимальное значение прямоугольного импульса тока длительностью 2000 мкс., которое ОПН должен выдержать 18 раз с принятой последовательностью их приложения без потери рабочих качеств;
- **уровень остающегося напряжения при коммутационном импульсе - ($U_{30/60}$)** - максимальное значение напряжения на ограничителе при протекании через него импульсного тока с длительностью фронта импульса 30 мкс и временем полу спада импульса 60 мкс;
- **уровень остающегося напряжения при грозовом импульсе - ($U_{8/20}$)** - максимальное значение напряжения на ограничителе при протекании через него импульсного тока с длительностью фронта импульса 8 мкс и временем полу спада импульса 20 мкс;

- **величина тока срабатывания противозрывного устройства** – величина тока при котором противозрывное устройство обеспечивает снижение внутреннего давления в ограничителе при возникновении в нем короткого замыкания и предотвращающее взрывное разрушение корпуса ОПН или его разрушение с разлетом осколков за нормируемую зону;
- **длина пути утечки внешней изоляции.**

Основные параметры ограничителя выбирают, исходя из назначения, требуемого уровня ограничения перенапряжений, места установки, а также схемы сети и ее параметров (наибольшего рабочего напряжения сети, способа заземления нейтрали, величины емкостного тока замыкания на землю и степени его компенсации, длительности существования однофазного замыкания на землю и т.д.)

По назначению ограничители применяют для защиты оборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений.

В соответствии с ПУЭ при защите от грозовых перенапряжений ОПН устанавливают:

- в РУ 6-35 кВ, к которым присоединены ВЛ;
- в схемах грозозащиты вращающихся машин;
- на обмотках 6-35 кВ автотрансформаторов,
- на обмотках 6-10 кВ трансформаторов, в случае установки молниеотводов на трансформаторных порталах.

При защите от коммутационных перенапряжений ОПН могут быть установлены на присоединениях с выключателями, коммутирующими вращающиеся машины и трансформаторы, а также в электроустановках, имеющих облегченную или ослабленную в процессе эксплуатации изоляцию (вращающиеся машины, высоковольтные кабели, сухие трансформаторы и т.д.).

3.2. Методика выбора основных параметров ОПН.

При выборе ОПН необходимо решить Следующие основные задачи:

1. ОПН должен ограничить коммутационные и грозовые перенапряжения до значений, при которых обеспечивается надежная работа изоляции защищаемых электроустановок;

2. ОПН должен надежно работать, не теряя своей термической устойчивости¹, при непрерывном воздействии наибольших рабочих напряжений сети;

3. ОПН должен надежно работать, не теряя своей термической устойчивости, при воздействии квазистационарных перенапряжений в рабочих и аварийных режимах;

4. ОПН должен быть взрывобезопасен при протекании токов к.з. в результате внутренних повреждений;

5. ОПН должен соответствовать механическим и климатическим условиям эксплуатации.

Для решения перечисленных задач необходима следующая информация о параметрах сети и оборудования:

- наибольшее рабочее напряжение сети;
- режим заземления нейтрали;
- схема и структура защищаемой подстанции с указанием расстояний по ошиновке между аппаратами;
- структура сети, прилегающей к подстанции, где устанавливаются ОПН;
- значения токов к.з.
- наиболее вероятные виды грозовых и внутренних перенапряжений;
- данные о составе релейной защиты и автоматики уставках времени срабатывания различных устройств защиты;
- сведения о характеристиках генераторов, трансформаторов, синхронных компенсаторов, электродвигателей и другой нагрузки;
- допустимый уровень изоляции оборудования.

В настоящем документе рассматриваются общие рекомендации по выбору ОПН, а также рекомендации учитывающие особенности тех или иных электроустановок.

3.2.1. Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН.

В сетях 6-35 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостного тока замыкания на землю и допускающих неограниченно длительное существование однофазного замыкания на землю (033), наибольшее рабочее длительно допустимое напряжение ограничителя выбирается большим или равным наибольшему рабочему напряжению электрооборудования для данного класса напряжения по

¹ Термическая неустойчивость ОПН - повышение температуры ограничителя, приводящее к потере его тепловой стабильности, вызванной нарастанием температуры варисторов при протекании через него тока до величины, приводящей к необратимому изменению его параметров или разрушению.

ГОСТ 1516.3 или наибольшему рабочему напряжению сети. Их значения приведены в табл.6

$$U_{н.р.} \geq U_{н.р.об} \quad (4)$$

где $U_{н.р.}$ - наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН

$U_{н.р.об}$ – наибольшее рабочее напряжение защищаемого оборудования.

Таблица 6.

Наибольшее рабочее напряжение сети.

Класс напряжения электрооборудования, кВ	6	10	15	20	35
Наибольшее рабочее напряжение сети, кВ	7,2	12,0	17,5	24	40,5

Если длительность однофазного замыкания на землю ограничивается, то наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН должно удовлетворять следующему условию:

$$U_{н.р.} \geq U_{н.р.об.} / Kt, \text{ где} \quad (5)$$

Kt - коэффициент, равный отношению допустимого повышения напряжения в течении времени t к наибольшему длительно допустимому рабочему напряжению ограничителя.

Значение Kt определяют для значения времени однофазного замыкания на землю (t_{033}) по зависимости «напряжения - время»² для случая с предварительным нагружением нормируемым импульсом энергии.

Время существования однофазного замыкания на землю определяют по данным эксплуатации для места установки ОПН.

Длительность существования 033 зависит от вида электрических сетей и составляет:

- в контролируемых сетях, питаемых от турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, а также с присоединенными мощными электродвигателями, с токами однофазного замыкания на землю в генераторной цепи более 5 А - не более 0,5сек. При токе однофазного замыкания на землю ниже 5 А - 2ч и может быть увеличено до 6ч, если однофазное замыкание находится вне обмоток;

² **Характеристика «напряжение-время»** - выдерживаемое напряжение промышленной частоты в зависимости от времени его приложения к ОПН. Показывает максимальный промежуток времени, в течение которого к ОПН может быть приложено напряжение промышленной частоты, превышающее $U_{нр}$, не вызывая [потери тепловой стабильности или повреждения](#).

- в кабельных сетях 6-35 кВ, не содержащих присоединенных турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов и мощных электродвигателей -2ч и может быть допущено увеличение до 6ч по согласованию с энергоснабжающей организацией;

- в воздушных сетях, работающих с изолированной нейтралью или компенсацией емкостного тока замыкания на землю и не содержащих электростанций и присоединений с электродвигателями, время отключения однофазного замыкания на землю не нормируется.

Нормированные значения для $U_{н.р.}$ действительны для температуры окружающей среды до 45° С с учетом дополнительного нагрева от солнечной радиации. Если имеются другие источники повышения температуры окружающей среды, то необходимо увеличить значение $U_{н.р.}$. Как правило, это необходимо при использовании ОПН встроенных в электрооборудование (силовые трансформаторы, ячейки КРУ и КСО и другие виды оборудования).

Если температура окружающей среды превышает 45° С, то $U_{н.р.}$ увеличивают на 2% для каждых 5 градусов повышения температуры окружающей среды. В ряде случаев ОПН устанавливают на шинах подстанции или на шинах во внутренних распределительных устройствах (ячейках КРУ или КСО). В этом случае необходимо учитывать возможный нагрев ОПН от медных или алюминиевых шин. Расчетная температура шин, к которым может быть присоединен ОПН составляет 70° С. В этом случае наибольшее длительно допустимое напряжение ОПН необходимо увеличить на 10% по сравнению с паспортными условиями эксплуатации.

3.2.2. Выбор номинального разрядного тока ОПН.

Выбор ОПН по номинальному разрядному току производится в случае установки его для защиты от грозových перенапряжений.

Во всех случаях, кроме оговоренных ниже номинальный разрядный ток принимают равным 5кА.

Номинальный разрядный ток принимают равным 10кА в следующих случаях:

- в районах с интенсивной грозовой деятельностью более 50 грозových часов в год;
- в схемах грозозащиты двигателей и генераторов, присоединенных к ВЛ;
- в районах с высокой степенью промышленных загрязнений (IV степень загрязнения атмосферы) или, если ограничитель расположен в 1000 или менее метрах от моря;
- в схемах грозозащиты, к которым предъявляются повышенные требования к надежности.

3.2.3. Определение защитного уровня ограничителя.

Определяющим при выборе защитного уровня ОПН является его назначение (для защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений) и уровень выдерживаемых перенапряжений изоляцией электрооборудования.

3.2.3.1. Определение защитного уровня ограничителя при грозовых перенапряжениях.

Испытательное напряжение электрооборудования 6-35 кВ координируется в настоящее время с остающимся напряжением вентильного разрядника при расчетном токе координации (5кА). Поэтому остающееся напряжение ограничителей при грозовых перенапряжениях должно быть не выше остающегося напряжения вентильного разрядника группы IV или группы III по ГОСТ 16357 [4] соответственно для ОПН класса 6-10 и 35кВ, т.е. не более значений, приведенных в табл. 7.

Таблица 7.

Максимальные значения остающихся перенапряжений при грозовом импульсе ограничителей (5 кА) для сетей 6-35 кВ.

Класс напряжения электрооборудования, кВ	3	6	10	15	20	35
Напряжение при импульсе 8/20 мкс с амплитудой 5000 А, не более, кВ	14	27	45	61	80	130

Ограничитель ($I_{ном}=5$ кА) должен быть отстроен от работы при перенапряжениях, вызванных ОЗЗ. Это требование выполняется при условии, если значение остающегося напряжения на ограничителе на импульсе тока 30/60 мкс с максимальным значением 500 А не ниже значений приведенных в таблице 8.

Таблица 8

Значения остающегося напряжения U_{500} для отстройки от перенапряжений вызванных ОЗЗ.

Класс напряжения	3	6	10	15	20	35
Остающееся напряжение U_{500} на импульсе 30/60 мкс 500 А, не менее	9.0	18	29	43	59	99

В этом случае пропускная способность ограничителя должна быть не менее 200 А. При защите электрических машин (генераторов, синхронных компенсаторов и электро-

двигателей мощностью более 3 МВт), присоединенных к ВЛ значение $U_{ост}$ ограничителя на токе 500 А (30/60 мкс), устанавливаемого на выводах электрической машины вместе с емкостью не менее 0,5 мкФ, выбирают ниже или равными значений приведенных в табл.9

Таблица 9.

Допустимый уровень ограничения перенапряжений электрических машин.

Мощность электрической машины, кВт	Номинальное напряжение электрической машины, кВ	Испытательное напряжение, кВ, действующее	Допустимое напряжение, кВ, максимальное
До 1000	3,15	$2U_{н+1}=7,3$	10,3
	6	$2U_{н+1}=13$	18,4
	6,3	$2U_{н+1}=13,6$	19,2
	10	$2U_{н+1}=21$	29,7
	10,5	$2U_{н+1}=22$	31
Свыше 1000	3,15	$2,5U_{н}=7,9$	11,1
	6	$2,5U_{н}=15$	21,2
	6,3	$2,5U_{н}=15,75$	22,2
	10	$2U_{н+3}=23$	32,5
	10,5	$2U_{н+3}=24$	33,8

3.2.3.2. Места установки ОПН для защиты от грозových перенапряжений.

При защите трансформатора от грозových перенапряжений ОПН должен устанавливаться на защищаемом трансформаторе до коммутационного аппарата.

В РУ 3-10 кВ при выполнении связи трансформаторов с шинами при помощи кабелей расстояние от ОПН до трансформатора и аппаратов не ограничивается. При применении воздушной связи с шинами РУ расстояние от ОПН до трансформатора и аппаратов не должно превышать 60 м при ВЛ на деревянных опорах и 90 м на металлических и железобетонных опорах. В РУ 35 кВ расстояние до ошиновки, включая ответвления от ограничителя до защищаемого объекта, выбирается в соответствии с рекомендациями ПУЭ. Значения этих расстояний при использовании ОПН-У 35 кВ приведены в таблице 10, 11.

Таблица 10.

Наименьшие допустимые расстояния от ОПН/TEL-35/40.5 и ОПН-У-35/42 до силовых трансформаторов 35 кВ.

Число ВЛ постоянно подключенных к шинам ПС	Защищенный подход на ВЛ		Расстояние от ОПН до оборудования, м			
	Тип опоры	Длина защищенного подхода, км	Количество комплектов ОПН/TEL- 35/40.5		Количество комплектов ОПН-У 35/42	
			1	2	1	2
1 (тупиковая ПС)	Горизонтальное расположение проводов	0,5	23	35	22	33
		1,0	46	69	44	66
		1,5	69	104	66	99
		2,0	87	116	83	110
	Негоризонтальное расположение проводов	1,0	23	35	22	33
		1,5	35	58	33	55
		2,0	52	81	50	77
2	Горизонтальное расположение проводов	0,5	35	46	33	44
		1,0	58	116	55	110
		1,5	93	139	88	132
		2,0	116	174	110	165
	Горизонтальное расположение проводов	1,0	35	46	33	44
		1,5	58	69	55	66
		2,0	81	104	77	99
3 и более	Горизонтальное расположение проводов	0,5	41	52	39	50
		1,0	104	139	99	132
		1,5	139	174	132	165
		2,0	174	208	165	198
	Горизонтальное расположение проводов	1,0	46	58	44	55
		1,5	69	81	66	77
		2,0	104	116	99	110

Таблица 11.

Наименьшие допустимые расстояния от ОПН/TEL-35/40.5 и ОПН-У 35/42 до оборудования 35 кВ.

Число ВЛ постоянно подключенных к шинам ПС	Защищенный подход на ВЛ		Расстояние от ОПН до оборудования, м			
	Тип опоры	Длина защищенного подхода, км	Количество комплектов ОПН-ОПН/TEL-35/40.5		Количество комплектов ОПН-У 35/42	
			1	2	1	2
1 (тупиковая ПС)	Горизонтальное расположение проводов	0,5	30	48	28	45
		1,0	90	120	85	113
		1,5	120	156	113	147
		2,0	150	180	141	169
	Негоризонтальное расположение проводов	1,0	48	48	45	45
		1,5	72	72	68	68
		2,0	84	84	79	79
2	Горизонтальное расположение проводов	0,5	36	60	34	56
		1,0	120	180	113	169
		1,5	150	240	141	225
		2,0	180	240	169	225
	Горизонтальное расположение проводов	1,0	60	120	56	113
		1,5	96	144	90	135
		2,0	108	180	101	169
3 и более	Горизонтальное расположение проводов	0,5	36	60	34	56
		1,0	120	180	113	169
		1,5	150	240	141	225
		2,0	180	240	169	225
	Горизонтальное расположение проводов	1,0	60	120	56	113
		1,5	96	144	90	135
		2,0	108	180	101	169

3.2.3.3. Определение защитного уровня ограничителя при коммутационных перенапряжениях.

Величина коммутационных перенапряжений определяет значение остающегося напряжения на ограничителе, которое должно быть при расчетном токе коммутационных перенапряжений не более выдерживаемого напряжения изоляцией защищаемого электрооборудования. Значения допустимых уровней перенапряжений приведены в таблицах 1, 2, 3, 4 для различных видов защищаемого оборудования.

Расчетный ток коммутационного перенапряжений зависит от вида и величины неограниченных перенапряжений. Значение этого тока и соответствующее ему значение остающегося напряжения на ограничителе определяют либо по программе расчета переходных процессов для рассматриваемой коммутации, либо с некоторым запасом по значению остающегося напряжения конкретного типа ОПН при коммутационном импульсе 30/60 мкс с амплитудой 500А.

Уровень ограничения коммутационных перенапряжений при дуговых замыканиях с 10% недокомпенсацией емкостного тока может быть определен по кривой рис.5 в зависимости от параметра f .

$$f = (50Z/U_{\phi}) \times (U_{\phi}/A)^{1/\alpha}, \quad (5)$$

где

$$Z = \sqrt{1,5L / 2 * (C_0 + C)}$$

α - 0,04- степень нелинейности варисторов.

$$L = U_{\phi} / 314 * I_{кз}$$

$$U_{\phi} = (U_{\text{раб сети}} * \sqrt{2}) * \sqrt{3}$$

$I_{кз}$ - трехфазный ток КЗ в месте установки ОПН

C_0, C_m - емкость фазы на землю и между фазами ОПН

$$C_0 = I_c / 0,942 U_{\phi},$$

где I_c - емкостной ток на землю в сети (А). $C_m = 0,27 C_0$ - для кабеля $C_m = 0,4 C_0$ - для ВЛ

$$A = U_{500} / 500^{\alpha}.$$

По полученной величине остающегося напряжения определяют расчетный коммутационный ток как: $I = (U_{500}/A^{500})^{1/\alpha}, \text{ А.}$

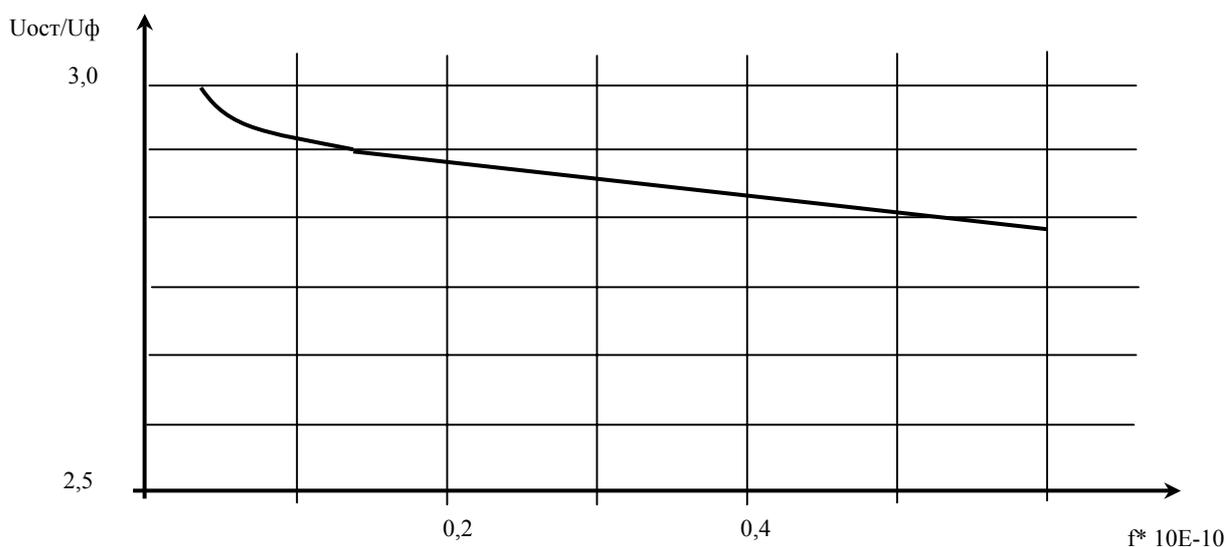


Рис. 5

3.2.4. Выбор энергоемкости ограничителя.

Расчет энергоемкости ОПН необходимо проводить в случае установки ОПН в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью в которых, возможно возникновение дуговых замыканий на землю. В этом случае наибольшие энергетические воздействия соответствуют работе ограничителя при дуговых перенапряжениях однофазного замыкания на землю.

Токовые и энергетические воздействия на ограничитель и рассеиваемая им энергия в этом режиме определяют расчетом по любой программе расчета переходных процессов, позволяющей учитывать величину емкостного тока замыкания на землю, степень его компенсации, наличие и величину реактанса токоограничивающих реакторов.

При расчетах принимают 10% недокомпенсацию емкостного тока замыкания на землю, которая моделирует возможный аварийный режим.

Для оценки максимальной суммарной энергии, рассеиваемой ограничителем за одно замыкание, используется следующее выражение:

$$W_{\text{сум}} = 0,5 * C_{\text{сети}} * (U_{\text{пер}}^{**2} - U_{\text{ост}}^{**2}) * n \quad (6)$$

$U_{\text{пер}}$ – уровень перенапряжений при дуговых замыканиях на землю (определяется по рис 1.)

$U_{\text{ост}}$ – уровень ограничений ОПН при дуговых замыканиях (определяется выше)

$C_{\text{сети}}$ – емкость сети (определяется по уровню емкостного тока сети)

n – число повторных зажигания. С учетом длительности режима существования дуговых замыканий (2-3 с) и возможностью их возникновения в каждый полупериод $n=100-200$.

При установке на присоединениях РС-цепочек, I_c должно быть определено с учетом емкостей этих цепочек.

Суммарная расчетная энергия, рассеиваемая ОПН за время ограничения дуговых замыканий, должна быть не более нормируемой для него энергии:

$$W_{\text{опн}} \geq W_{\text{сум}} \quad (7)$$

3.2.5. Выбор тока срабатывания взрывопредохранительного устройства.

Ток срабатывания взрывопредохранительного устройства (для сброса давления) ОПН, должен быть не менее, чем на 10% больше значения двухфазного или трехфазного (большого из них) тока короткого замыкания ($I_{\text{кз}}$) в месте установки ограничителя.

3.2.6. Выбор длины пути утечки внешней изоляции ограничителя.

Длина пути утечки внешней изоляции ограничителя наружной установки должна выбираться в зависимости от степени загрязнения по ГОСТ 9920-89, но должна быть не менее указанной в таблице 12 длины пути утечки.

Таблица 12.

Минимальные длины пути утечки внешней изоляции ограничителей.

Класс напряжения электрооборудования, кВ	3	6	10	15	22	35
Длина пути утечки, см не менее	7,0	13,0	22,0	31,5	43,2	75,0

3.2.7. Выбор типа ограничителя.

Выбор типа ограничителя осуществляют в соответствии с определенными в выше положениями и значениями параметров ОПН.

Для случая установки ОПН в районах с повышенной гололедно-ветровой нагрузкой, где возможны частые обрывы проводов, необходимо проверить выбранный тип ОПН на устойчивость к воздействию квазиустановившегося перенапряжения, возникшего в результате неполнофазного режима.

Если при обрыве провода длина ВЛ, присоединенная к трансформатору менее величины

$$L_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{хх}} \% \cdot S_{\text{H}}}{188C_1 \cdot U_{\text{H}}^2} \quad [\text{км}], \text{ где} \quad (8)$$

$I_{\text{хх}} \%$ - ток холостого хода в %,

$S_{\text{H}}, U_{\text{H}}$ - номинальные мощность [кВА] и напряжение [кВ] трансформатора.

C_1 - погонная емкость прямой последовательности [мкф/км],

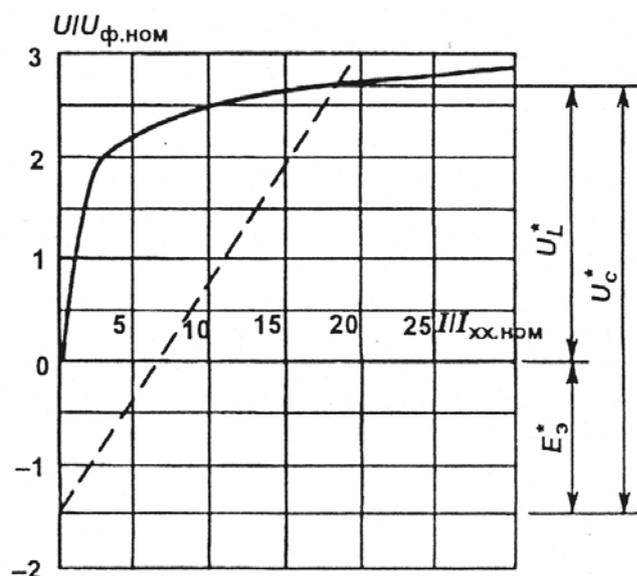


Рис. 6

то перенапряжения не превышают величины линейного напряжения и не представляют опасности для электрооборудования.

Если $L > L_{нр}$, то повышение напряжения определяется по изложенной ниже методике.

На рис. 6 приведена обобщенная зависимость фазного напряжения на линии $U_{фл}$ от тока намагничивания трансформатора I_{μ} с изолированной нейтралью при обрыве фазы этой линии (отпайки от

нее). Параметры зависимости приведены в о.е.: напряжения - по отношению к номинальному напряжению трансформатора и тока по отношению к номинальному току намагничивания трансформатора (току холостого хода).

По двум точкам строят зависимость напряжения на емкости линии $U'_{фл}$, рассчитывая ее значения по формуле:

$$U'_{фл} = I_{\mu н} \cdot I^*_{\mu н} / Y \cdot L \cdot U_{фн}, \text{ о.е.} \quad (9)$$

где Y - удельная проводимость линии по нулевой последовательности, сим;

L - длина линии от места обрыва до трансформатора, км;

$I_{\mu н}$ - номинальный ток намагничивания трансформаторов, А;

$I^*_{\mu н}$ - номинальный ток намагничивания, о.е. по отношению к номинальному току трансформатора, о.е. - из рис.6;

$U_{фн}$ - номинальное фазное напряжение трансформатора, кВ.

Пересечение построенной прямой $U'_{фл}$ с обобщенной зависимостью $U_{фл}$ дает значение установившегося перенапряжения на линии. Эти перенапряжения могут существовать несколько часов.

По зависимости "напряжение - время" ОПН для случая без предварительного нагружения энергией при длительности 11000 сек определяют значение K_t , рассчитывают $U^{**}_{нро} = U_y / K_t$. Полученное значение $U^{**}_{нро}$ сравнивают с ранее выбранным значением наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН

Если $U_{н.д.} \geq U^{**}_{нро}$, то выбранный тип ОПН удовлетворяет всем условиям.

Если $U_{н.д.} < U^{**}_{нро}$, то выбирают ОПН с новым $U_{н.д.}$, удовлетворяющим условию:

$$U_{н.д.} \geq U^{**}_{нро}.$$

3.2.8. Особенности выбора ОПН для защиты от коммутационных перенапряжений.

3.2.8.1. Выбор параметров ограничителей для защиты сети СН электростанций от перенапряжений при дуговых замыканиях на землю.

В сетях СН электростанций ОПН устанавливают для защиты сети и электродвигателей от коммутационных перенапряжений, возникающих при дуговых замыканиях на землю. Т. к. наименьший выдерживаемый уровень изоляции имеет электродвигатель, то ограничитель выбирают в первую очередь из условия ограничения перенапряжений до величины, допустимой для электродвигателя.

Сеть СН электростанции может работать с изолированной нейтралью, либо с нейтралью заземленной через дугогасительный реактор (ДГР), либо с нейтралью заземленной через резистор.

3.2.8.2. Выбор параметров ОПН для защиты сети СН, работающей с изолированной нейтралью или нейтралью заземленной через ДГР.

Наибольшее длительно допустимое напряжение ограничителя для защиты сети СН от дуговых перенапряжений выбирается, исходя из следующих положений:

- наибольшее рабочее напряжение сети не должно превышать 1,1 номинального напряжения электродвигателя, т.е. 6,6 кВ,
- длительность однофазного замыкания на землю не должна превышать 2 часов.

Учет этих условий определяет наибольшее допустимое напряжение ОПН.

Требуемый уровень ограничения коммутационных перенапряжений определяют по требованию ограничения перенапряжений при дуговых замыканиях на землю до допустимого уровня. ОН обеспечивается при расчетном токе коммутационного импульса через ОПН равном 100 А.

Амплитуда импульса тока пропускной способности ограничителя на прямоугольной волне длительностью 2000 мкс зависит от величины емкостного тока замыкания на землю сети СН и определяется необходимой энергоемкостью ОПН при дуговых замыканиях.

При расчетах ориентируются на то, что:

- при емкостном токе замыкания на землю не более 10 А и работе сети с изолированной нейтралью (схема питания сети СН от трансформатора) или при емкостном токе до 100 А и работе сети со 100% компенсацией емкостного тока замыкания на землю амплитуда импульса тока пропускной способности должна быть не ниже 500 А.

Ограничитель устанавливается на шинах каждой секции СН в свободной ячейке или ячейке трансформатора напряжения (ТН) до предохранителя. Возможна установка ОПН в ячейке с секционным выключателем.

Для защиты СН с большими значениями токов замыкания на землю необходимо использовать 2-3 комплекта ОПН на каждой секции шин. Важно, чтобы ОПН были одного типа и с одинаковыми значениям наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения.

3.2.8.3. Выбор параметров ОПН для защиты сети СН, работающей с нейтралью заземленной через резистор.

В сетях 6 кВ СН электростанций значение сопротивления резистора, включаемого в нейтраль заземляющего трансформатора, выбирают таким образом, чтобы ток через резистор при однофазном замыкании на землю был не менее емкостного тока замыкания на землю (обычно сопротивление резистора равно 100 Ом). В этом случае перенапряжения при дуговых замыканиях на землю ограничены до уровня 2,2-2,4U_ф, а релейная защита надежно отключает поврежденное присоединение.

Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя выбирается, исходя из:

- наибольшее рабочее напряжение сети не должно превышать 1,1 номинального напряжения электродвигателя, т.е. 6,6 кВ [7],
- длительность однофазного замыкания на землю определяется временем действия релейной защиты, отключающей замыкание. Это время не превышает обычно 5с.

С учетом снижения перенапряжений с помощью резистора в нейтрали до уровня 2,3-2,4U_ф и отключения однофазного замыкания на землю за время не более 1 с пропускная способность ограничителя может быть принята не менее 250 А.

Ограничитель включается в цепь заземляющего трансформатора до выключателя.

В качестве резервного аппарата на шинах СН устанавливается дополнительный ОПН, поскольку при отказе в действии релейной защиты и не отключении поврежденного присоединения, отключается присоединение с заземляющим трансформатором, и сеть переходит в режим работы с изолированной нейтралью.

3.2.9. Выбор ограничителя для защиты ГРУ от дуговых перенапряжений.

Защита ГРУ от дуговых перенапряжений может потребоваться, если имеются случаи отказа электрооборудования при однофазных дуговых замыканиях на землю или кабельная сеть, подключенная к ГРУ имеет достаточно высокую повреждаемость и если потребителями ГРУ являются источники повышенных перенапряжений, например, плавильные печи.

Поскольку к шинам ГРУ подключены генераторы, то наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя выбирается, исходя из:

- наибольшее рабочее напряжение сети не должно превышать 1,15 номинального напряжения генератора, т.е. 6,9 и 11,5 кВ соответственно для ГРУ 6 и 10 кВ,
- длительность однофазного замыкания на землю не должна превышать 2 часов .

При выполнении указанных требований $U_{н.д.}$ должно быть не ниже 6,9 кВ и 11,5 кВ для сетей 6 и 10кВ соответственно.

Требуемый уровень ограничения перенапряжений определяется величиной испытательного напряжения генератора (Таблица 9). Такой уровень ограничения перенапряжений обеспечивается при расчетном токе коммутационного импульса через ОПН равном 100 А. При определении пропускной способности ограничителя необходимо учитывать, что РУ ГРУ имеет, как правило, секционные и линейные токоограничивающие реакторы, что увеличивает токовые и энергетические воздействия на ОПН.

Ограничитель следует устанавливать на каждой секции ГРУ в свободной ячейке или в ячейке ТН. При возможности параллельной работы секций ГРУ устанавливаемые на секциях ограничители должны быть специально подобраны по своим характеристикам.

3.2.10. Выбор параметров ОПН для защиты от перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями.

Установка ОПН на присоединениях с вакуумными выключателями ограничивает перенапряжения, связанные с обрывом тока и эскалацией напряжений, сокращает число повторных зажиганий, а, следовательно, число опасных перенапряжений и полностью исключает перенапряжения при виртуальном срезе тока.

Защита от перенапряжений требуется при коммутациях вакуумными выключателями присоединений с электродвигателями и трансформаторами.

Не требуется защита от перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями:

- трансформаторов, защищенных по условию грозозащиты вентильными разрядниками или ОПН.
- трансформаторов СН в кабельных сетях, длина подключаемых кабелей которых больше или равна приведенным в таблице 13 значениям.

Таблица 13

Класс напряжения, кВ	Длина кабеля, м, при мощности трансформатора, кВт				
	250	630	1000	1600	2500
6	50	120	150	200	240
10	30	90	115	150	180

Для защиты электродвигателя от перенапряжений, инициируемых вакуумным выключателем, ограничитель устанавливается в сети 6 кВ. При установке ограничителей в нескольких ячейках характеристики ограничителей должны быть специально подобраны для их параллельной работы. В этом случае ограничители будут подвержены меньшим токовым и энергетическим воздействиям при однофазных дуговых замыканиях на землю, что повысит надежность работы сети и ОПН.

Наибольшая эффективность ограничения перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями, достигается при установке ОПН параллельно выключателю или непосредственно у защищаемого объекта.

Возможна установка ограничителя в ячейке выключателя в начале кабеля. В этом случае необходима проверка уровня перенапряжений на двигателе, которые не должны превышать выдерживаемый изоляцией двигателя уровень испытательных напряжений

3.3. Место установки и монтаж ОПН

Рекомендации по применению ОПН 6-10 кВ в кабельных промышленных сетях с двигательной и трансформаторной нагрузкой (Табл.14)

Таблица 14.

Защита двигателей и трансформаторов.

Вид нагрузки	Двигатель			Трансформатор	
	До 50 м	Свыше 50 м		До 300 м	Свыше 300 м
Длина фидера					
Способ установки	Фаза-земля	Параллельно контактам выключателя	Фаза-земля	Фаза-земля	Не требуется

Тип ОПН	ОПН-РТ 6/6.9 или 10/11.5*	ОПН-КР 6/6.0 или 10/10.5	ОПН-РТ 6/6.9 или 10/11.5*	ОПН-РТ 6/6.9 или 10/11.5*	Не тре- буется
Место ус- тановки	Линейный отсек КРУ за транс- форматором то- ка	В ячейке**	Рядом с двигателем по схеме «Фаза- земля»	Линейный отсек КРУ за транс- формато- ром тока	Не тре- буется

* - если емкостной ток сети, в которой применяется ячейка меньше 1 А, то допустимо использование ОПН-КР вместо ОПН-РТ с теми же параметрами.

** - если данный способ установки ОПН не возможен, допустима установка ОПН в линейном отсеку КРУ за трансформаторами тока. Схема «фаза-земля» ОПН-РТ 6/6.9 или 10/11.5.

Таблица 15.

Защита кабельных сетей от дуговых перенапряжений. Рекомендации по защите кабельных сетей от дуговых перенапряжений

Значение емкостного тока сети, А	<1	1-10	10-100	>100
Тип ОПН	ОПН-КР 6/6.9 или 10/11.5	ОПН-РТ 6/6.9 или 10/11.5	ОПН-РТ 6/6.9 или 10/11.5	ОПН-РТ 6/6.9 или 10/11.5
Количество ОПН	1 комплект на каждой секции шин	1 комплект на каждой секции шин	2 комплекта на каждой секции шин	3 комплекта на каждой секции шин
Место присоединения	На сборных ши- нах (Например, в шкафу ТН)	На сборных ши- нах (Например, в шкафу ТН)	На сборных шинах (Например, в шкафу ТН)**	На сборных шинах (Например, в шкафу ТН)**

** - в случае невозможности размещения нескольких комплектов в одном шкафу допустима их установка в разных шкафах одной секции за исключением вводных шкафов.

Таблица 16.

Рекомендации по выбору и применению ОПН 6-10 кВ (воздушные сети)

Способ установки	Наружная установка (УХЛ1)	Внутренняя установка (УХЛ2)
Тип установки	Фаза-земля	Фаза-земля
Тип ОПН	ОПН-РС 6/7.6 или 10/12.7*	ОПН-КР 6/6.9 или 10/12.0**
Место установки	Вне шкафа	Линейный отсек КРУ за трансформатором тока

* - если емкостной ток сети превышает 1 А рекомендуется использовать ОПН-Т 6/7.6 или 10/11.5

** - если емкостной ток сети превышает 1 А рекомендуется использовать ОПН-РТ 6/7.2 или 10/11.5

Данные рекомендации соответствуют нормативным документам РАО ЕЭС России:

РАО «ЕЭС России» Методические указания по применению ограничителей перенапряжений в электрических сетях 6-35 кВ. Изд-во НТК «Электропроект», 2001.

РАО «ЕЭС России» Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений (РД 153-34-35. 125-99). Изд-во ПЭИПК, 1999.

Циркуляр Ц-5-98 от 30 октября 1998 г.

Ограничители перенапряжений не требуют специальной подготовки к эксплуатации, кроме внешнего осмотра, подтверждающего отсутствие повреждений корпуса и электродов, загрязнения его поверхности.

Болты для присоединения ограничителя к электрической цепи должны быть выполнены из металла, стойкого к коррозии или покрыты металлом предохраняющим от коррозии, и не должны иметь поверхностной окраски.

Вокруг болта должна быть контактная площадка для присоединения проводника (шины) диаметром не менее 20 мм. Площадка должна быть защищена от коррозии. Допускается необходимую поверхность соприкосновения в соединении обеспечить при помощи шайб.

В качестве меры против возможного ослабления контактов между проводником и болтом рекомендуется использование контргаек или пружинных шайб.

Момент затяжки болтов при подсоединении фазного и заземляющего проводников должен составлять не более 30 Нм.

С целью исключения неучтенных механических тяжений при подключении ОПН по схеме «фаза-земля» рекомендуется:

- жесткое соединение ОПН к шине заземления;
- подключение ОПН к фазной шине осуществлять по кратчайшему пути при помощи однопровитного медного проводника с поперечным сечением не менее 6 мм² или алюминиевым проводником не менее 16 мм². Рекомендуется применение гибкой стальной шины толщиной 1 мм и шириной 20-30 мм. Расстояния между ограничителями и другими заземленными и токоведущими элементами устанавливаются согласно рекомендациям ПУЭ.

РК ТАВРИДА ЭЛЕКТРИК
Центральный офис

123 298, МОСКВА, а/я 15. Тел.: (095) 787 25 25. Факс: (095) 943 12 95.
E-mail: rosim@tavrida.ru.

Региональные представительства

АСТАНА	Тел./факс: (3172)32 31 90
ВЛАДИВОСТОК	Тел./факс: (4232) 22 32 03
ВОЛГОГРАД	Тел./факс: (8442) 93 08 68
ГУБКИН	Тел./факс: (07241) 2 86 26
ЕКАТЕРИНБУРГ	Тел./факс: (3432) 29 44 92
ИРКУТСК	Тел./факс: (3952) 20 66 30
КАЗАНЬ	Тел./факс: (8432) 99 50 53
КРАСНОЯРСК	Тел./факс: (3912) 27 20 51
ЛИПЕЦК	Тел./факс: (0742) 70 66 27
МИНСК	Тел.: (10375172) 41 76 12
МОСКВА	Тел./факс: (095) 261 83 09
НИЖНИЙ НОВГОРОД	Тел./факс: (8312) 51 14 87
НОВОСИБИРСК	Тел./факс: (3832) 74 30 78
ОМСК	Тел./факс: (3812) 23 64 82
РОСТОВ-НА-ДОНУ	Тел./факс: (8632) 36 00 83
САМАРА	Тел./факс: (8462) 63 50 04
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ	Тел./факс: (812) 373 23 61
СУРГУТ	Тел./факс: (3462) 51 53 94
УФА	Тел./факс: (3472) 28 52 57
ЧЕРЕПОВЕЦ	Тел./факс: (8202) 59 72 65

www.tavrida.ru