



ВЫБОР НЕЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ
ДЛЯ УСТАНОВКИ В СЕТЯХ 110 – 750 кВ

Научный руководитель,
доктор технических наук,
профессор,
действительный член Академии
электротехнических наук

Ф.Х. Халилов

Санкт-Петербург 2005г.

Оглавление

Введение

1. Общие положения и терминология

1.1. Общее

1.2. Область применения ограничителей

1.3. Терминология

1.4. Классификация ограничителей перенапряжений

2. Выбор ограничителей перенапряжений

2.1. Выбор наибольшего допустимого U_{HP} и расчетного наибольшего допустимого напряжения U_{PHP} ограничителей

2.2. Определение других параметров, необходимых для выбора ограничителей

2.3. Окончательный выбор ограничителей

3. Общие рекомендации по размещению ОПН

3.1. Выбор расстояния от ОПН до защищаемого оборудования

3.2. Место установки ОПН

3.3. Условия работы ОПН на подстанциях с элегазовой изоляцией

3.4. Мероприятия, направленные на повышение надежности работы ОПН

3.5. Вопросы эксплуатации ОПН

Заключение

Список использованной литературы

Введение

В настоящее время в Российской Федерации, а также практически во всех технических развитых зарубежных странах мира прекращено производство вентильных разрядников, являющихся до последнего времени основным средством защиты от перенапряжений. Однако последние обладают рядом недостатков, основными из которых являются:

- 1) обладают высоким импульсным пробивным напряжением $U_{пр}$ и высоким остающимся напряжением при токах 3, 5 и 10 кА, вследствие чего уровень неограниченных перенапряжений достаточно высок (так, например, для сетей 220 кВ $U_{пр} = (3 \div 3,3)U_{фн}$, для различных групп разрядников по ГОСТ 16357-83);
- 2) имеют ограниченную пропускную способность, что заставляет отстроить эти защитные аппараты от большинства внутренних перенапряжений, обладающих большой запасенной электромагнитной энергией;
- 3) после 20 – 25 лет эксплуатации разрядники несколько (до 20÷25%) повышают свои вольтамперные и вольтсекундные характеристики, что в итоге в значительной степени ухудшает защиту электрооборудования от перенапряжений;
- 4) при срабатывании вблизи индуктивных элементов (силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов, трансформаторов напряжения) вызывают в их обмотках градиентные (продольные) перенапряжения, опасные для изоляции;
- 5) из – за наличия искровых промежутков и шунтирующих сопротивлений обладают большими массо – габаритными характеристиками, что связано с серьезными затратами при транспортировке и монтаже (особенно в слабоосвоенных северных районах страны).

По перечисленным причинам приблизительно 30 лет тому назад в России началось интенсивное развитие работ по созданию новых аппаратов – нелинейных ограничителей перенапряжений на основе высоконелинейных оксидно – цинковых варисторов. В те годы аналогичные работы велись только в США и Японии [1].

В настоящее время в стране осуществляется массовый переход от вентильных разрядников к ограничителям перенапряжений. Это продиктовано массовым старением вентильных разрядников, некоторые из которых эксплуатируются более 40 – 50 лет и выходом в свет некоторых директивных документов (смотри, например, [2,3]).

Необоснованный выбор характеристик ОПН, их неправильная эксплуатация могут привести к повреждению самих защитных аппаратов, вызвать серьезные аварии в энергосистемах и электрических сетях промышленных предприятий.

В настоящей технической записке сделана попытка облегчить труд работников энергосистем и энергетиков промышленных предприятий, а также предприятий – изготовителей в выборе ОПН, их размещении в сетях, а также эксплуатации.

1. Общие положения и терминология.

1.1. Общее

Любая изоляционная конструкция, независимо от ее исполнения и класса напряжения, в эксплуатации подвергается длительному рабочему напряжению, кратковременным грозовым перенапряжениям микросекундного диапазона, более длительным перенапряжениям (коммутационным, дуговым и феррорезонансным) миллисекундного или секундного диапазонов. Для сетей 110 кВ и выше, работающих в режиме эффективного заземления нейтрали, основное значение имеют грозовые, квазистационарные и коммутационные перенапряжения.

Как отмечалось во введении, до последнего времени основным элементом системы защиты от перенапряжений сетей высокого, сверхвысокого и ультравысокого классов напряжения являлись вентильные разрядники. Наличие искровых промежутков и шунтирующих сопротивлений, а также невысокая нелинейность рабочих сопротивлений эти защитные аппараты делает громоздкими и не обеспечивает высокой пропускной способности, необходимой для ограничения не только грозовых, но и внутренних перенапряжений.

По перечисленным причинам в восьмидесятые годы прошлого века у нас в стране приостановили производство вентильных разрядников и перешли к освоению нелинейных ограничителей перенапряжений на базе варисторов из оксида цинка и окислов других металлов.

Создание упомянутых ограничителей позволило частично отказаться от искровых промежутков (в ограничителях ОПН серии ОПНИ для ограничения междуфазных перенапряжений применяются дополнительные искровые промежутки), значительно (на 30÷50 %) снизить уровень ограничения коммутационных перенапряжений, в 2-3 раза улучшить массо-габаритные показатели защитных аппаратов, существенно сэкономить фарфор, алюминиевое литье, прокат черных и цветных металлов.

Первые нелинейные ограничители перенапряжений, разработанные общими усилиями НИИ «Электрокерамика» (г. Ленинград), отраслевых институтов Минтопэнерго (ВЭИ, ВНИИЭ, НИИПТ, «Энергосетьпроект», СибНИИЭ) ряда ВУЗов страны (ЛПИ им. М.И. Калинина, НЭТИ, МЭИ и др.), позволили осуществить широкую программу улучшения технико – экономических показателей сетей высокого, сверхвысокого и ультравысокого классов напряжения. Они позволили снизить габариты ОРУ и ЗРУ, сократить площади, занимаемые ими, снизить объемы строительных и монтажных работ, сэкономить материалы при строительстве и производстве кабельных работ, снизить сроки и стоимость строительства, а во многих случаях снизить испытательные напряжения защищаемого электрооборудования.

Нелинейные ограничители перенапряжений (в дальнейшем сокращенно ОПН), в отличие от вентильных разрядников, не имеют искровых промежутков и непосредственно подключаются к защищаемому объекту. Это достигается благодаря применению в них оксидно-цинковых варисторов, обладающих высоконелинейной вольтамперной характеристикой (коэффициент нелинейности α в зависимости $U = AI^\alpha$ приблизительно равен 0,03 – 0,04) и достаточно высокой

пропускной способностью. По упомянутой причине в ряде стран ОПН называются вентильными разрядниками без искровых промежутков.

В нормальном режиме через ограничители перенапряжений, находящихся под рабочим напряжением, течет ток от долей миллиампера до нескольких миллиампер в зависимости от номинального напряжения защищаемого объекта, характеристик варисторов и конструкции аппарата. При этом его внутреннее сопротивление находится в пределах от десятков до сотен мегаом. Однако при появлении перенапряжений в течение наносекунд внутреннее сопротивление аппарата снижается на несколько порядков, а ток через ОПН возрастает в $10^6 \div 10^7$ раз. В итоге защитный аппарат рассеивает электромагнитную энергию переходного процесса в окружающую среду и ограничители глубоко ограничивают перенапряжения, независимо от природы их возникновения.

1.2. Область применения ограничителей.

Данное техническое руководство распространяется на ограничители перенапряжений с высоконелинейными варисторами, предназначенные для ограничения грозовых и коммутационных перенапряжений в силовых цепях однофазного и трехфазного переменного тока частотой 50 Гц в сетях 110 – 750 кВ, работающих в режиме с глухим (эффективным) заземлением нейтрали. Ограничители перенапряжений могут быть установлены на открытых и закрытых распределительных устройствах (шины, присоединения силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов, батарей конденсаторов), на тепловых, гидравлических и атомных электростанциях, в комплектных подстанциях, а также на линиях для защиты ослабленных мест (пересечения линий высокого напряжения между собой, пересечения линий ВЛ с линиями связи, с электрифицированной и неэлектрифицированной железной дорогой, на высоких переходных опорах, на разъединителях секционирования, вблизи кабельных вставок, на ослабленных (железобетонных и металлических) опорах линий, имеющих смешанные опоры и т.д.).

Ограничители перенапряжений могут быть подключены:

- между токоведущими частями и землей, например, между вводами силовых трансформаторов и землей;
- в нейтрали силовых трансформаторов 110, 150 и 220 кВ;
- в нейтрали четырехлучевых шунтирующих реакторов;
- на опорах линий электропередачи в особых случаях, например, в гололедоопасных участках, где применение грозозащитных тросов нецелесообразно;
- между фазами электрооборудования и линий, например, между фазами распределительного устройства с уменьшенными относительно общепринятых междуфазными расстояниями.

1.3. Терминология

Нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН) – защитный аппарат, который содержит последовательно или последовательно – параллельно соединенные варисторы, и не имеет искровых промежутков.

Варистор – часть ограничителя перенапряжений, которая при рабочем напряжении промышленной частоты обладает большим сопротивлением, при перенапряжениях малым сопротивлением. Это достигается, благодаря высоконелинейной вольтамперной характеристике. Варисторы изготавливаются из керамических материалов, содержащих окись цинка и другие окислы металлов, спеченных вместе.

Экраном ограничителя – называется металлический элемент (обычно круглой формы, установленный на верхней части аппарата) и служащий для электростатического управления распределением напряжения вдоль колонки ограничителя.

Пропорциональная часть ограничителя – соответствующим образом собранная и укомплектованная часть аппарата, необходимая для представительного воспроизведения работы всего ограничителя при ряде испытаний.

Элемент ограничителя – полностью укомплектованная в соответствующей оболочке часть ограничителя, которая может быть соединена последовательно или параллельно с другими элементами для повышения номинальных параметров ограничителя по напряжению или по току.

Устройство для сброса давления – служит для уменьшения давления в ограничителе и предотвращения сильного разрушения корпуса, которое может произойти вследствие длительного протекания тока повреждения или короткого замыкания, а также перекрытия внутри корпуса ограничителя.

Номинальное напряжение ограничителя – в отечественной практике аппаратостроения приравнивается номинальному напряжению защищаемого оборудования. В правилах МЭК под термином «номинальное напряжение ограничителя» понимается максимально допустимое действующее значение напряжения промышленной частоты между выводами (присоединениями) ограничителя, при котором он предназначен нормально работать в условиях кратковременного повышения напряжения, например, в течение десяти секунд.

Длительное рабочее напряжение $U_{НР}$ является допустимым действующим значением напряжения промышленной частоты, которое может быть длительно приложено к выводам ограничителя. В отечественной терминологии понятию «длительное рабочее напряжение» соответствует наибольшее рабочее напряжение $U_{НР}$, которое приложено к ОПН в течение всего срока его службы или достаточно длительно.

Длительное расчетное рабочее напряжение $U_{РНР}$ – действующее значение напряжения промышленной частоты, приложенное к выводам ограничителя в течение времени t_p

$$U_{РНР} = \frac{U_{НР}}{K_6},$$

где K_g - некоторый коэффициент, зависящий от расчетного времени t_r и технологии изготовления варисторов ограничителей (смотри дальше).

Номинальная частота f_H - частота электрической сети для которой предназначен ограничитель. В ряде стран, например, в Швеции и Швейцарии (фирма АВВ) считают, что если значение номинальной частоты f_H особо не оговорено, то ограничитель должен быть рассчитан на $(15 \div 62)$ Гц.

Разрушающий пробой варистора – пробой варистора, как твердого «диэлектрика», после которого варистор не восстанавливает свои прежние функции.

Импульс тока или напряжения. Для выбора технических характеристик ОПН важное значение имеют импульсы тока и напряжения. Униполярная импульсная волна тока или напряжения быстро нарастает (без заметных колебаний) до максимального значения и затем уменьшается с меньшей скоростью до нуля с небольшими переходами в противоположную полярность или без них. Импульсы тока или напряжения характеризуются полярностью, амплитудой, длительностью фронта и временем до полуспада. Последние условно обозначаются как $T1/T2$, где $T1$ – длительность фронта, $T2$ – длительность волны или длительность до полуспада.

Амплитуда импульса – максимальное значение импульса напряжения или тока без учета наложенных колебаний.

Фронт импульса – часть импульса, непосредственно предшествующая амплитуде, спад («хвост») импульса, следующая за амплитудой.

Условное начало импульса – точка в зависимостях $i=f_1(t)$ и $u=f_2(t)$, определяемая пересечением оси времени и прямой, проходящей через две точки на фронте импульса, соответствующие 10% и 90% от амплитудного значения.

Условная длительность фронта импульса тока ($T1$) – время (в мкс), равное $1,25 \tau$, где τ – время необходимое для увеличения тока от 10% до 90% от его амплитудного значения.

Условная крутизна фронта импульса – есть частное от деления амплитудного значения на условную длительность фронта импульса.

Условное время до полуспада ($T2$) – интервал времени (в мкс) между условным началом импульса и моментом, когда напряжение или ток уменьшается до половины их амплитудного значения.

Импульс тока большой длительности (прямоугольный импульс) – прямоугольный импульс, длительностью $2000 \div 2400$ мкс, который быстро возрастает до максимального значения, остается практически постоянным в течение этого периода времени, а затем быстро падает до нуля. Параметрами, определяющими прямоугольный импульс, являются полярность, максимальное (амплитудное) значение и длительность.

Условная длительность прямоугольного импульса – время, в течение которого мгновенное значение импульса больше 10% от его максимального (амплитудного) значения. Если есть небольшие колебания на фронте, то должна быть начерчена средняя кривая для определения момента достижения значения, равного 10%.

Условная полная длительность амплитуды прямоугольного импульса – время, в течение которого мгновенное значение импульса больше 90% его амплитудного значения.

Крутой (быстронарастающий) импульс тока – импульс тока с временем фронта 1 мкс и длительностью импульса не более 20 мкс.

Грозовой импульс тока – импульс тока 8/20 мкс при длительности фронта импульса в диапазоне от 7 до 9 мкс (в среднем 8 мкс) и длительности импульса в диапазоне от 18 до 22 мкс (в среднем 20 мкс).

Разрядный ток ограничителя – импульс тока, протекающий через ОПН.

Амплитудное значение волны противоположной полярности импульса – наибольшая из амплитуд противоположной полярности, достигаемой импульсом напряжения или тока в процессе колебаний относительно нуля перед затуханием до постоянного нулевого значения.

Номинальный разрядный ток ОПН (I_H) – максимальное (амплитудное) значение грозового импульса тока 8/20 мкс, используемое для классификации ОПН.

Сильноточный импульс ограничителя - амплитудное значение разрядного тока, имеющего форму импульса 4/10 мкс, который предназначен для испытания ограничителя на устойчивость при прямом ударе молнии.

Коммутационный импульс тока ограничителя – амплитудное значение разрядного тока с параметрами 1,2/2,5 мс (по МЭК $30 \leq T_1 \leq 100/60 \leq T \leq 200$ мкс).

Длительный ток ограничителя – ток, протекающий через ограничитель при приложении к нему длительного рабочего напряжения. Он зависит от технологии изготовления варисторов, температуры и степени загрязнения внешней изоляции аппарата. Показателем этого тока может служить его амплитудное или действующее значение.

Классификационный ток ограничителя – амплитудное значение активной составляющей тока промышленной частоты для определения классификационного напряжения аппарата. В материалах МЭК рекомендуется ток от 0,05 до 1 мА на 1 см² площади варистора одноколлекторного ОПН.

Классификационное напряжение ограничителя - амплитудное значение напряжения промышленной частоты, деленное на $\sqrt{2}$, которое прикладывается к ОПН для получения классификационного тока.

Остающееся напряжение ограничителя – амплитудное значение напряжения на выводах ограничителя при протекании разрядного тока.

Квазистационарные перенапряжения – перенапряжения, возникающие при неблагоприятном сочетании реактивных элементов цепи и ЭДС питающей системы, и продолжающиеся до тех пор, пока это сочетание существует.

Пропускная способность ОПН ($I_{пр}$) – нормируемое изготовителем максимальное значение прямоугольного импульса тока длительностью 2000 мкс (тока пропускной способности). ОПН должен выдержать 18 таких воздействий с принятой последовательностью их приложения без потери рабочих качеств.

Комплектовочное напряжение ОПН ($U_{ком}$) – нормируемое изготовителем остающееся напряжение ОПН при нормированном им же максимальном значении тока грозового импульса ($I_{ком}$ – ток комплектовки) в диапазоне 0,01 – 2,0 номинального разрядного тока ОПН. На данное напряжение изготовитель комплектует ОПН по сумме результатов измерений на элементах, секциях или единичных варисторах.

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.

Удельная энергия – рассеиваемая ограничителем энергия, полученная им при приложении одного импульса тока пропускной способности, в долях наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения.

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.

Взрывобезопасность – отсутствие взрывного разрушения или разрушение ОПН с разлетом осколков в нормируемой зоне при его внутреннем повреждении.

Квалификационные испытания ОПН - в соответствии с ГОСТ 16504.

Приемо – сдаточные испытания – в соответствии с ГОСТ 16504.

Типовые испытания - в соответствии с ГОСТ 16504.

Периодические испытания - в соответствии с ГОСТ 16504.

1.4. Классификация ограничителей перенапряжений.

Нелинейные ограничители перенапряжений условно обозначаются материалом внешней изоляции, номинальным напряжением сети, максимальным расчетным рабочим напряжением сети в точке установки защитного аппарата, номинальным разрядным током грозовых импульсов, классом пропускной способности (класс разряда линии, пропускная способность в режиме ограничения коммутационных токов), климатическим исполнением и категорией размещения аппарата по ГОСТ 15150. Так например, аппарат ОПН-П-110/73/10/2-УХЛ1, является полимерным ограничителем, предназначенным для работы в сети 110 кВ. Он рассчитан на 73 кВ максимального длительного рабочего напряжения, 10 кА импульсного тока, 2 класс по пропускной способности (смотри таблицу 1.1), на климатические условия УХЛ и категорию размещения 1 (для работ на открытом воздухе) по ГОСТ 15150-69.

Стандартные значения номинальных напряжений ограничителей 110 кВ и выше в настоящее время таковы: 110; 150; 220; 330; 500 и 750 кВ. Кроме того, могут быть и нестандартные номинальные напряжения, например, для преобразовательных комплексов для передачи электроэнергии за рубеж или для выполнения различных технологических процессов в промышленности.

Однако, практически все предприятия–изготовители могут производить ограничители перенапряжений с номинальным рабочим напряжением в соответствии с рекомендациями МЭК [4], т.е. через каждые 3 кВ – в диапазоне от 30 до 54 кВ, 6 кВ – в диапазоне от 54 до 96 кВ, 12 кВ – в диапазоне от 96 до 288 кВ, 18 кВ – в диапазоне от 288 до 396 и 24 кВ - в диапазоне от 396 до 756 кВ.

Известно, что в настоящее время по различным причинам линии электропередачи «недогружены». По этой причине во многих частях электрических сетей и систем уровень напряжения оказывается выше, чем номинальное напряжение. Поэтому в ряде случаев приходится изготавливать ограничители перенапряжений с расчетным длительно допустимым напряжением $U_{НР}$ величиной выше номинального $U_{НР}$.

Таблица 1.1.

Классы пропускной способности

Класс пропускной способности	1	2	3	4	5
Пропускная способность, А	250-400	401-750	751-1100	1100-1600	1601-2100
Удельная энергия, не менее, кДж/кВ $U_{НР}$	1,0	2,0	3,2	4,5	7,1

Стандартная номинальная частота для Российской Федерации и СНГ – 50 Гц. Однако на практике частота может изменяться в пределах от 48 до 52 Гц.

Стандартными номинальными разрядными токами 8/20 мкс являются 1,5 кА, 2,5 кА, 5 кА, 10 кА и 20 кА. Ограничители должны работать без повреждения в нормальных или аномальных условиях.

К нормальным эксплуатационным условиям относятся:

- температура окружающего воздуха в диапазоне от -40°C до $+40^{\circ}\text{C}$;
- максимальная солнечная радиация $1,1 \text{ кДж/м}^2$;
- высота над уровнем моря не более 1000 м;
- частота не менее 48 Гц, не более 52 Гц;
- напряжение промышленной частоты, приложенное длительно между выводами ограничителями, не превышает его длительного рабочего напряжения;
- механические воздействия не превосходят величин, оговоренных покупателем;
- условия загрязнения соответствуют выбранной длине пути утечки.

Аномальными условиями эксплуатации считаются условия, отличные от нормальных, и требующие специального рассмотрения при их проектировании, производстве и эксплуатации.

Кроме рассмотренных выше влияющих факторов, нелишне оговорить следующие воздействия или параметры:

1. вольтамперные характеристики ограничителей при грозовых импульсах и внутренних (коммутационных) перенапряжениях;
2. уровень частичных разрядов при напряжении, составляющем 105% от наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения;
3. способность к рассеиванию энергии при прямоугольном импульсе;
4. электрическая прочность внешней изоляции (корпуса) ограничителя с учетом ее загрязнения и увлажнения.

2. Выбор ограничителя перенапряжений.

2.1. Выбор наибольшего допустимого $U_{НР}$ и расчетного наибольшего допустимого напряжения $U_{РНР}$ ограничителей.

Ограничитель перенапряжений, являясь средством ограничения перенапряжений на изоляции электрооборудования подстанций и линий, повышения надежности работы защищаемого объекта, не должен снижать надежности за счет собственного повреждения. Поэтому выбор этих защитных аппаратов, как и выбор любого электротехнического оборудования, должен быть тщательно взвешен и обоснован. В связи с изложенным, выбор ОПН, как правило, выполняется в два этапа:

- 1) предварительный выбор;
- 2) после определения влияющих факторов окончательный выбор.

Первым, и наиболее важным, шагом для выбора ограничителей является выбор длительно допустимого напряжения ОПН с учетом времени его воздействия. Для этого необходимо иметь максимальную информацию о сети (об объекте), где будет работать защитный аппарат.

Главным обстоятельством, определяющим безаварийную работу ограничителей, является длительно допустимое рабочее напряжение на аппарате. В Российской Федерации и большинстве стран СНГ оно оговорено директивными документами в рамках соответствующих правил и требований (ПТЭ, ПУЭ, РУ). По этим требованиям напряжение по подстанциях в нормальном режиме не должно быть больше, чем $\frac{1,15}{\sqrt{3}}U_{НОМ}$ - в сетях 110÷220 кВ, $\frac{1,1}{\sqrt{3}}U_{НОМ}$ - в сетях 330 кВ и $\frac{1,05}{\sqrt{3}}U_{НОМ}$ - в сетях 500÷750 кВ (таблица 2.1)

Таблица 2.1

Значения $U_{НР}$ для аппаратов, устанавливаемых на подстанциях 110-750 кВ в нормальном режиме

$U_{НОМ}$, кВ	110	150	220	330	500	750
$U_{НР}$, кВ	73	100	146	210	303	455

В этой таблице не учтены два обстоятельства, которые, вообще говоря, могут привести к некоторому дополнительному повышению напряжения на шинах подстанций.

1. При несимметричных однофазных (двухфазных) коротких замыканиях на землю на отходящих линиях на шинах подстанции, от которых питаются здоровые фазы (здоровая фаза) напряжение несколько возрастет по сравнению с симметричным режимом. Однако при реальных длинах линий 110-750 кВ (рис. 2.1)

и реальных соотношениях индуктивных сопротивлений по нулевой (X_0) и прямой (X_1) последовательностям ($\frac{X_0}{X_1} \leq 3$) коэффициент несимметрии (коэффициент дополнительного повышения напряжения на здоровых фазах по сравнению с симметричным режимом) не более $1,02 \div 1,04$. Это позволяет не учитывать это обстоятельство, поскольку вероятность совпадения времени короткого замыкания и повышения напряжения в симметричном режиме до $U_{НР}$ ничтожно мала.

2. При питании от шин подстанций ненагруженных линий в течение $10 \div 20$ мин. (рис 2.2) напряжение на подстанции несколько повышается. Однако, благодаря умеренным длинам линий и умеренным индуктивным предвключенным сопротивлениям подстанций на шинах, такое повышение не более $3 \div 5\%$ [5-7]. Это также позволяет не учитывать такое дополнительное повышение напряжения так как вероятность совпадения режима одностороннего питания линии от шин подстанции и повышения напряжения на шинах до $U_{НР}$ перед коммутацией ничтожно мала.

При выборе ОПН для установки в нейтрали трансформаторов $110 \div 220$ кВ в первом приближении можно считать, что на ОПН нейтрали длительно может воздействовать напряжение частотой 50 Гц не более $U_{ФН} = \frac{U_{НР}}{\sqrt{3}}$ (смотри дальше).

Варистор аппарата или ограничители перенапряжений, рассчитанные на определенное длительное напряжение $U_{НР}$, пропускает через себя определенный активный ток, который не нарушает их тепловой баланс (тепловую устойчивость). Это позволяет за счет сокращения длительности воздействия увеличить величину допустимого напряжения. Такая зависимость для фирм ЗАО «НИИ ЗАИ», «Центра энергетических защитных аппаратов», СП «АББ-УЭТМ», ТОО «Таврида - Электрик», «Сименс» (SIEMENS), ЗАО «Феникс – 88», АООТ «Корниловский фарфоровый завод», ОАО «Позитрон», фирмы «Балтэнерго», ООО «НПО Электро Полимер Изолит» и совместной фирмы «Электрозавод» - «Cooper Power Systems» приведены на рис. 2.3 – 2.19.

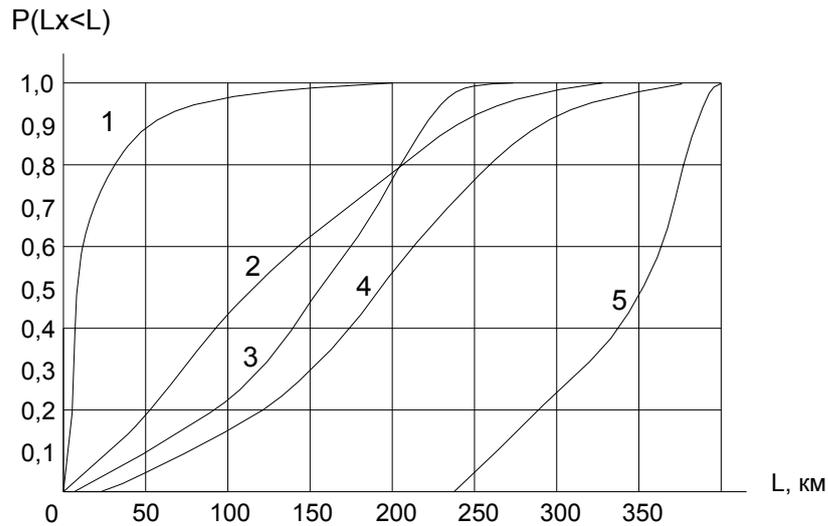


Рис. 2.1. Функции распределения длины линий 110 (1), 220 (2), 330 (3), 500 (4) и 750 (5) кВ

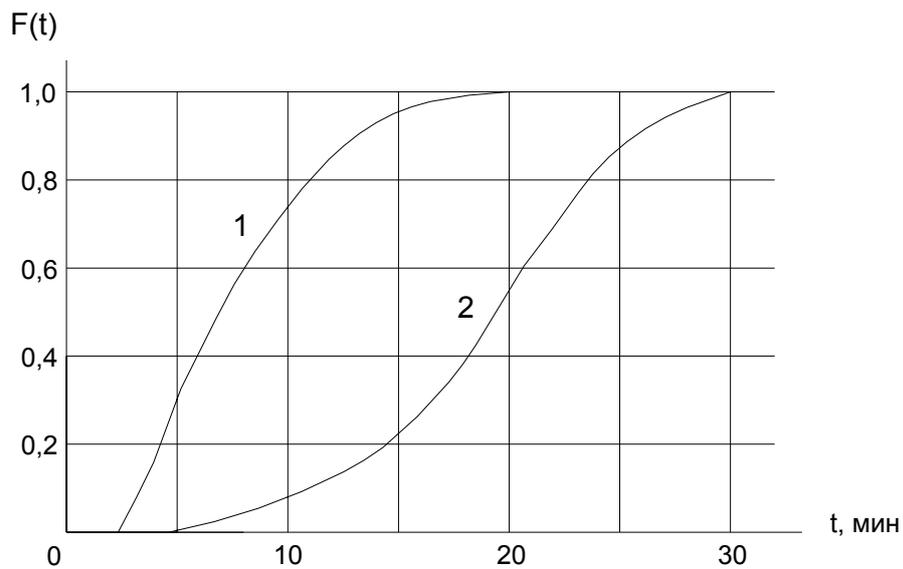


Рис. 2.2. Функции распределения времени одностороннего питания при оперативном включении (1) и отключении (2) линий 110 – 750 кВ

Перейдем к вопросам $U_{НР}$ и $U_{РНР}$ при установке ограничителей перенапряжений на линиях.

Наибольшие перенапряжения при переходных процессах и в установившемся режиме возникают на удаленном (разомкнутом) конце ненагруженных линий. Для определения $U_{НР}$ и $U_{РНР}$ рассмотрим следующие случаи:

- 1) напряжение в начале линии при отсутствии шунтирующих реакторов в симметричном режиме

$$U_H = \frac{E}{1 - \frac{X_{\Pi 1}}{Z_{\epsilon}} \operatorname{tg} \lambda};$$

- 2) напряжение в конце линии при наличии шунтирующих реакторов в симметричном режиме

$$U_K = \frac{E}{1 - \frac{X_{\Pi 1}}{Z_{\epsilon}} \operatorname{tg} \lambda} \cdot \frac{1}{\cos \lambda};$$

- 3) напряжение в начале линии при наличии шунтирующего реактора в конце линии в симметричном режиме

$$U_H = \frac{E}{1 - \frac{X_{\Pi 1}}{Z_{\epsilon}} \operatorname{tg}(\lambda - \lambda_p)};$$

- 4) напряжение в конце линии при наличии шунтирующего реактора в конце линии в симметричном режиме

$$U_K = \frac{E}{1 - \frac{X_{\Pi 1}}{Z_{\epsilon}} \operatorname{tg}(\lambda - \lambda_p)} \cdot \frac{1}{\cos(\lambda - \lambda_p)};$$

- 5) напряжение в конце двух фаз линии в неполнофазном (однофазном) режиме

$$U_K = E \cdot \frac{K_0 \cdot X_{BXO} - K_1 \cdot X_{BX1}}{2(X_{\Pi 1} + X_{BX1}) + (X_{\Pi 0} + X_{BXO})};$$

- 6) напряжение в конце одной фазы линии в неполнофазном (двухфазном) режиме:

$$U_K = E \cdot \frac{K_0 \cdot X_{BXO} - K_1 X_{BX1}}{(X_{\Pi 1} + X_{BX1}) + 2(X_{\Pi 0} + X_{BXO})};$$

- 7) напряжение на двух здоровых фазах при однофазном коротком замыкании в конце линии:

$$U_K = |U_{AH} [1,5 X'_{BX} / (X'_{BXO} + 2X'_{BX1}) - j0,866]|$$

- 8) напряжение на одной здоровой фазе при двухфазном коротком замыкании в конце линии:

$$U_K = \frac{U_{AH} 3 \cdot X'_{BXO}}{(2X'_{BXO} + X'_{BX1})},$$

где

E – эквивалентная ЭДС питающей подстанции;

Z_{ϵ} – волновое сопротивление линии по прямой последовательности, Ом;

λ – волновая длина линии: $\lambda = (0,06L)^{\circ}$;

L – длина линии в км;

λ_p – волновая длина линии, компенсированная шунтирующим реактором:

$$\lambda_p = \arctg \frac{S_p}{P_{НАТ}},$$

S_p - трехфазная мощность реактора,

$P_{НАТ}$ – натуральная мощность реактора,

$$P_{НАТ} = \frac{U_{НОМ}^2}{Z_B};$$

$U_{НОМ}$ – номинальное напряжение линии;

$X_{П1}, X_{П0}$ – эквивалентное сопротивление питающей подстанции по прямой и нулевой последовательности соответственно;

$X_{ВХ1}, X_{ВХ0}$ – входные сопротивления линии относительно ее начала;

K_1, K_0 – коэффициенты передачи по прямой и нулевой последовательностям, учитывающие повышения напряжения в конце линии по сравнению с ее началом;

$U_{АН}$ – фазное напряжение на «больной» фазе в месте к.з. перед его возникновением;

$X'_{ВХ1}, X'_{ВХ0}$ - входные сопротивления схемы относительно точки короткого замыкания.

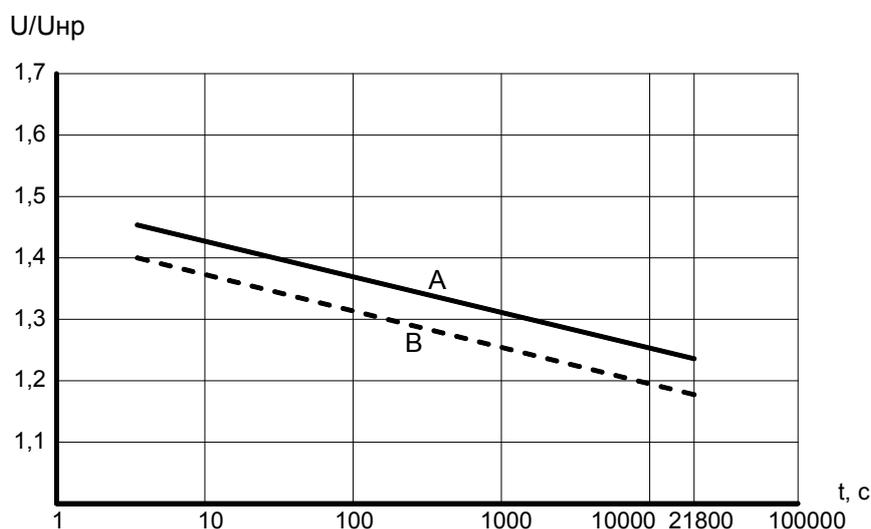


Рис. 2.3 Вольтвременные характеристики ограничителей перенапряжений ЗАО «НИИ ЗАИ»:

A – ОПН в исходном состоянии.

B – ОПН при предварительном воздействии 2-х импульсов тока пропускной способностью длительностью 2000 мкс с удельной поглощаемой энергией одного импульса 2,1 кДж на 1 кВ Unp.

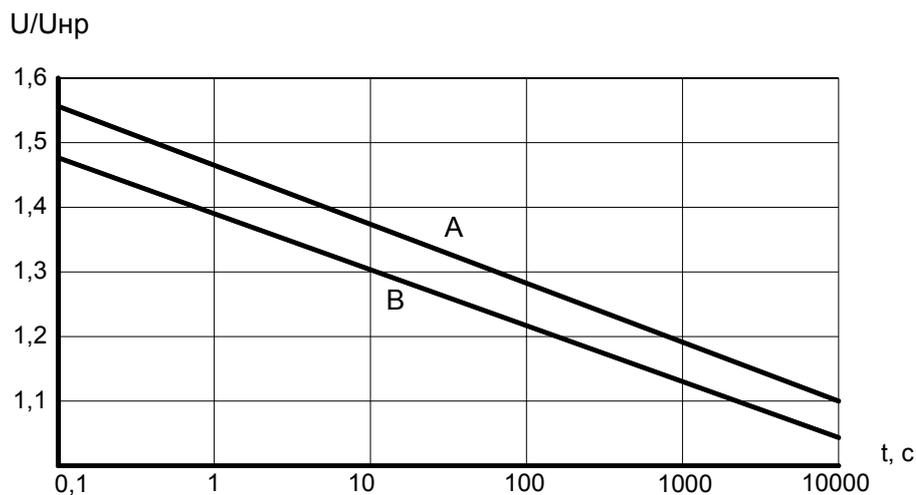


Рис. 2.4 Вольтвременные характеристики ограничителей перенапряжений ЦЭЗА- «Центр энергетических защитных аппаратов»:

А – ОПН в исходном состоянии при температуре окружающего воздуха +35°С.

В – ОПН при предварительном нагружении удельной поглощаемой энергией при температуре окружающего воздуха 35°С.

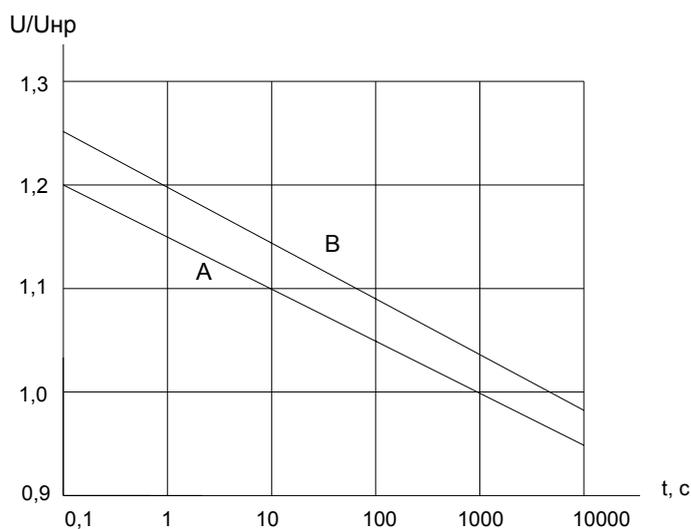


Рис 2.5. Зависимость относительных величин временных перенапряжений промышленной частоты, которые должны выдерживать ОПН EXLIM R («ABB – УЭТМ»), от их длительности:

А – при предварительном нагружении удельной поглощаемой энергией 2,5 кДж/кВ $U_{ном}$ при $t=+45\text{ }^{\circ}\text{C}$;

В – ОПН в исходном состоянии при температуре окружающего воздуха +45°C.

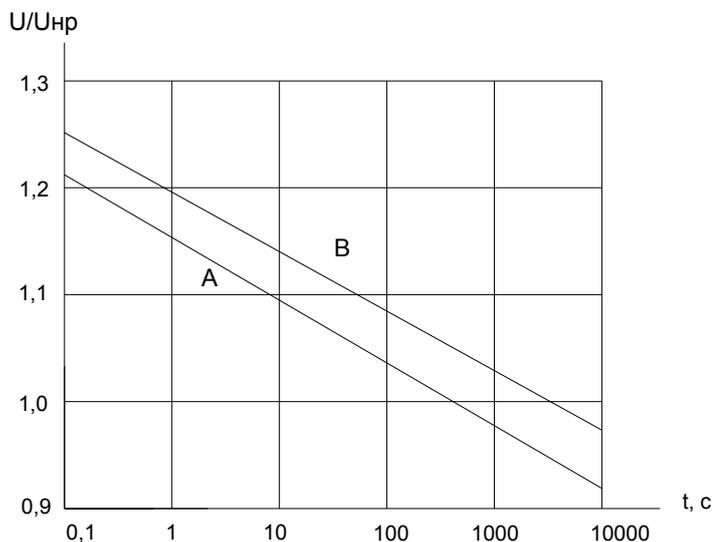


Рис. 2.6. Зависимость «напряжение – время» для ОПН EXLIM Q («ABB – УЭТМ»):
А – при предварительном нагружении удельной поглощаемой энергией 4,5 кДж/кВ $U_{ном}$ при $t=+45^\circ C$;
В – ОПН в исходном состоянии при температуре окружающего воздуха +45°C.

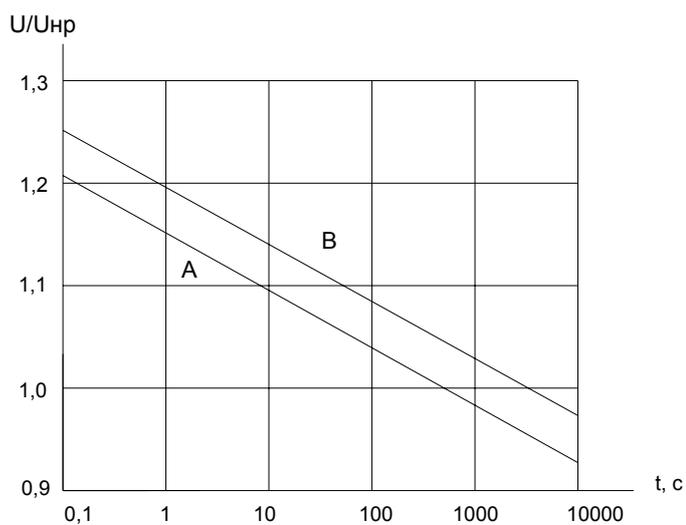
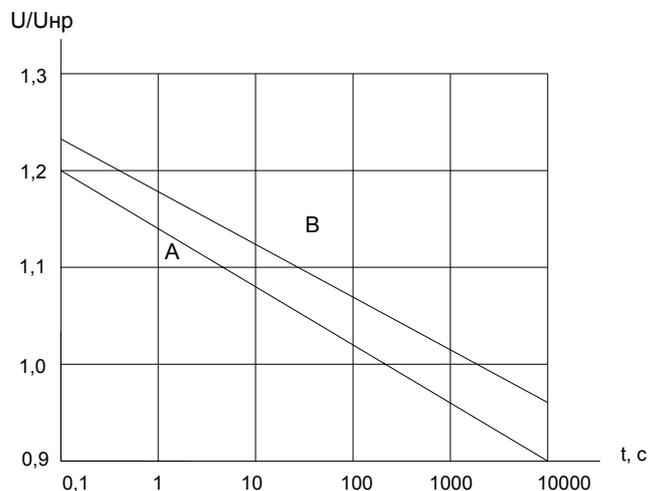


Рис. 2.7. Зависимость «напряжение – время» для ОПН EXLIM P («ABB – УЭТМ»):

- A – при предварительном нагружении удельной поглощаемой энергией 7,0 кДж/кВ $U_{ном}$ при $t=+45^{\circ}\text{C}$;
- B – ОПН в исходном состоянии при температуре окружающего воздуха $+45^{\circ}\text{C}$.



- Рис. 2.8. Зависимость «напряжение – время» для ОПН EXLIM T («ABB – УЭТМ»):
- A – при предварительном нагружении удельной поглощаемой энергией 10 кДж/кВ $U_{ном}$ при $t=+45^{\circ}\text{C}$;
 - B – ОПН в исходном состоянии при температуре окружающего воздуха $+45^{\circ}\text{C}$.

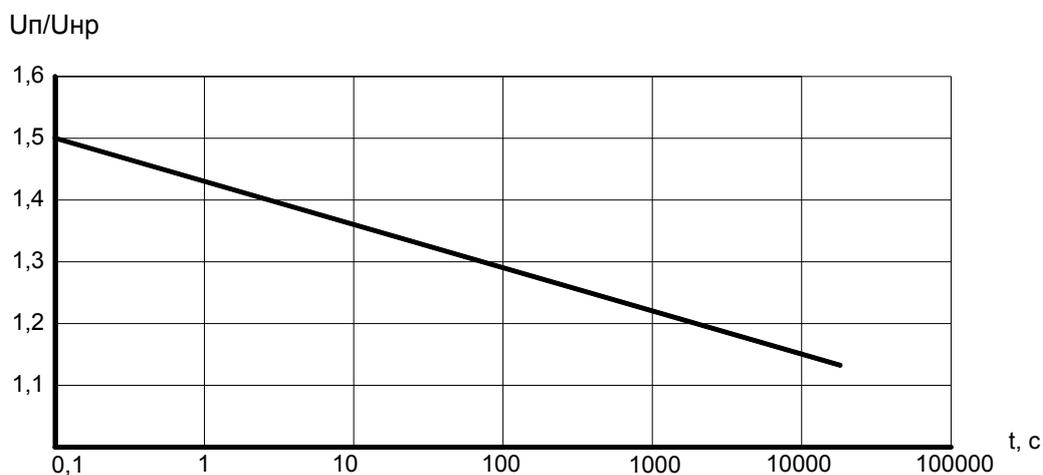


Рис. 2.9 Зависимость «допустимое напряжение- время» для случая педварительного нагружения импульсом 2,25 кДж на 1 кВ $U_{нр}$ для ОПН выпускаемых ООО «Таврида-Электрик» по ТУ№ИТЕА 674361.005

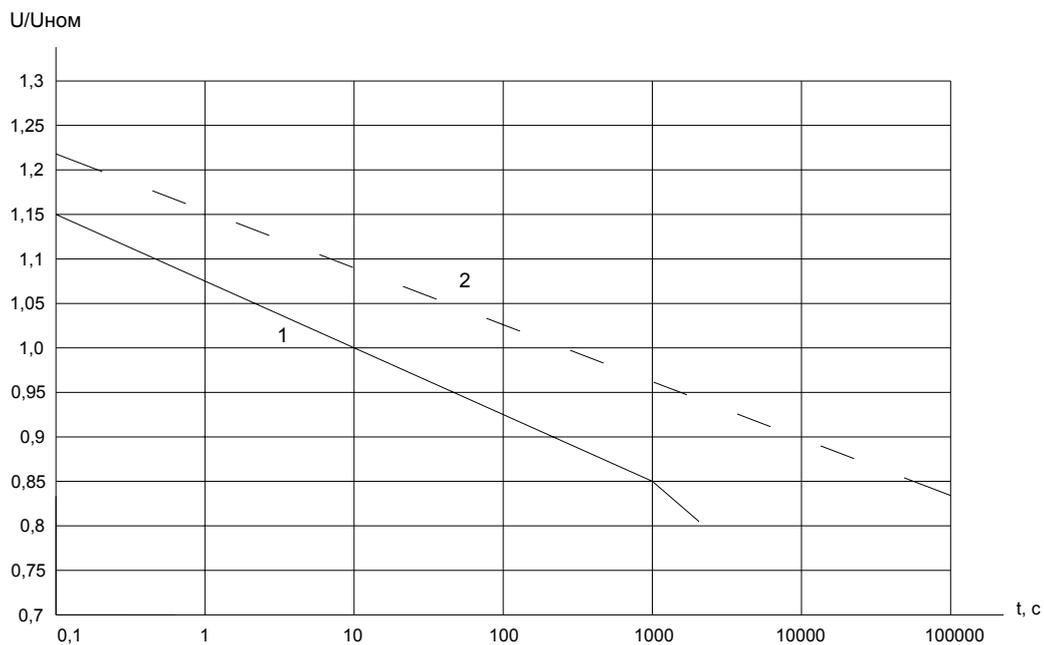


Рис. 2.10 Зависимость «Допустимое напряжение - время» для ОПН типа ЗЕК7 фирмы «SIEMENS».

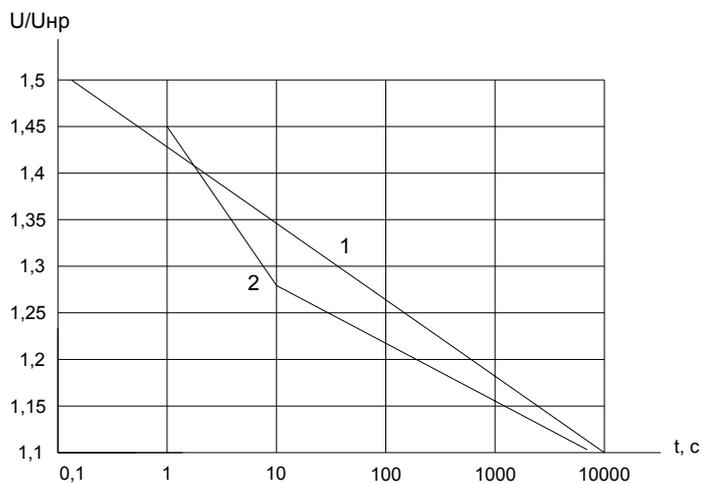


Рис. 2.11. Зависимость «допустимое напряжение - время» для случая:
 1 – предварительного нагрева и нагружения импульсом 2,5 кДж/кВ $U_{нр}$ для ОПН 110 – 220 кВ,
 выпускаемых ЗАО «Феникс - 88» по ТУ 3414-007-06968694;
 2 – Предварительного нагрева и нагружения импульсом 7,0 кДж/кВ $U_{нр}$ для ОПН 500 кВ,
 выпускаемых ЗАО «Феникс - 88» по ТУ 3414-013-01696869499.

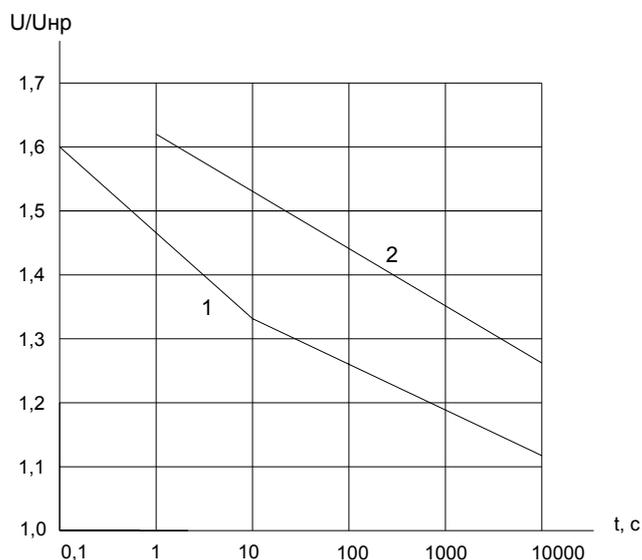


Рис. 2.12 Вольтвременная характеристика ограничителей перенапряжений АОЗТ
 «Корниловский фарфоровый завод»

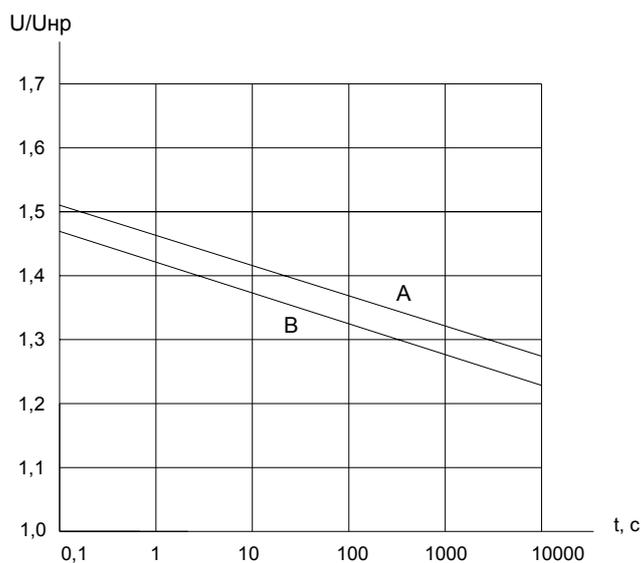


Рис. 2.13. Вольтвременная характеристика ограничителей перенапряжений ОАО «Позитрон»:
 А – ОПН в исходном состоянии;
 В – ОПН при предварительном воздействии 2-х нормированных импульсов тока пропускной способности.

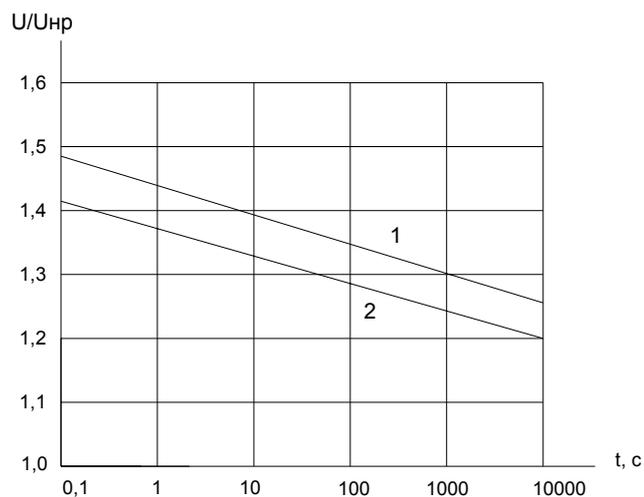


Рис. 2.14. Вольтвременная характеристика для ОПН 110 кВ и выше фирмы «Балиэнерго»:
 1 – ОПН в исходном состоянии;
 2 – ОПН при предварительном воздействии 2-х импульсов пропускной способности
 длительностью 2000 мкс с удельной поглощаемой энергией одного импульса 2,1 кДж
 на 1 кВ $U_{нр}$.

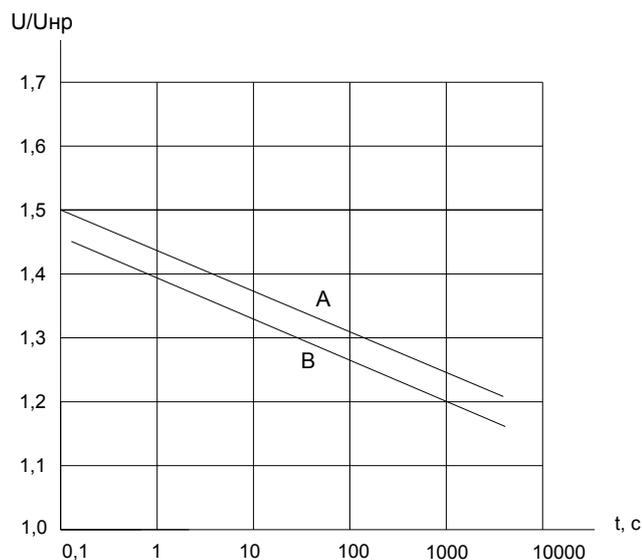


Рис. 2.15. Вольтвременная характеристика ОПН 110 кВ и выше ООО «НПК
 «Электрополимеризолит»:
 А – ОПН в исходном состоянии;
 В - ОПН при предварительном воздействии 2-х импульсов тока пропускной способности.

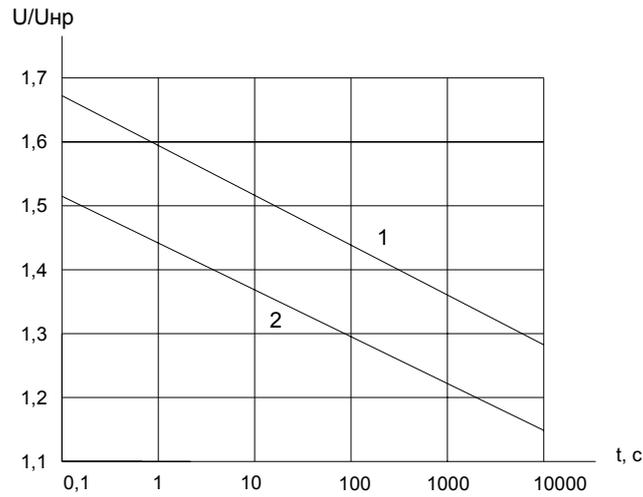


Рис. 2.16. Зависимость «напряжение - время» для ОПН VariSTAR (1 класс) совместной фирмы «Электрозавод – «Cooper Power Systems»:
 1 – без предварительной эксплуатации;
 2 – после испытаний по МЭК.

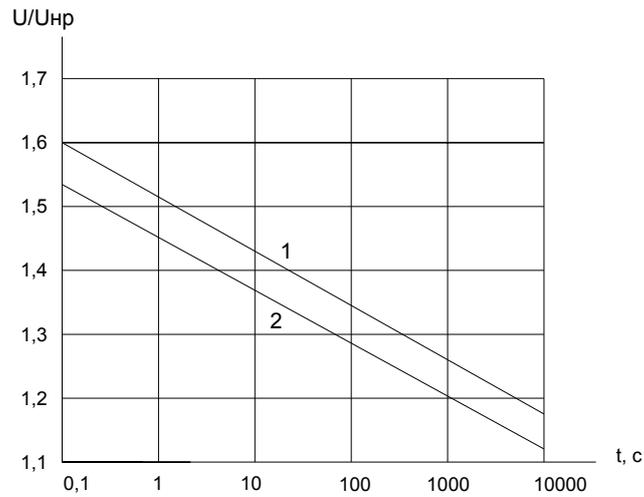


Рис 2.17. Зависимость «напряжение - время» для ОПН VariSTAR AZG2 (2 класс) совместной фирмы «Электрозавод – «Cooper Power Systems»:
 1 – без предварительной эксплуатации;
 2 – после испытаний по МЭК.

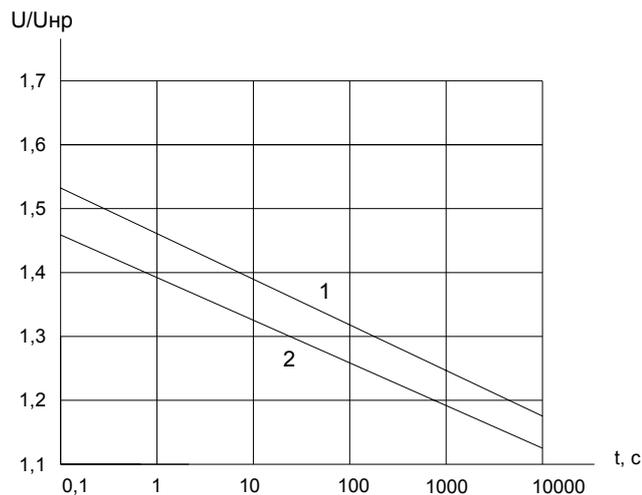


Рис. 2.18. Зависимость «напряжение - время» для ОПН VariSTAR AZG4 (4 класс) совместной фирмы «Электрозавод – «Cooper Power Systems»:
 1 – без предварительной эксплуатации;
 2 – после испытаний по МЭК.

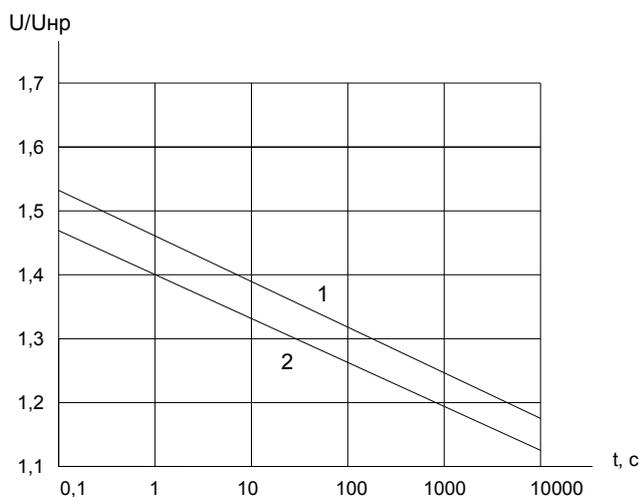


Рис. 2.19. Зависимость «напряжение - время» для ОПН VariSTAR AZG3 (3 класс) совместной фирмы «Электрозавод – «Cooper Power Systems»:
 1 – без предварительной эксплуатации;
 2 – после испытаний по МЭК.

Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. Определить расчетную величину длительно допустимого напряжения на ограничителе 220 кВ ООО «НПО Электро Полимер Изолит», устанавливаемого на подстанции тепловой электростанции при $E^* = 1,04$.

Без флюктации напряжения в зависимости от нагрузки линейное напряжение на шинах подстанции постоянно будет иметь величину $U = 220 \cdot 1,04 = 228,8$ кВ. поскольку по ГОСТу на качество электроэнергии напряжение может повышаться на 15%, то $U_{НР} \approx 263$ кВ. По каталогу ООО «НПО Электро Полимер Изолит» ближайшее $U_{НР} = \frac{263}{\sqrt{3}} = 152$ кВ является 156 кВ (ОПН-П-220/156/10/850 (II, III, IV)-УХЛ1).

Пример 2. Определить расчетную величину длительно допустимого напряжения на ограничителе 330 кВ ООО «НПО Электро Полимер Изолит» устанавливаемого на подстанции тепловой электростанции при $E^* = 1,0$.

Без флюктации напряжения в зависимости от нагрузки линейное напряжение на шинах подстанции будет иметь величину $U = E \cdot \frac{330}{\sqrt{3}} = 190$ кВ, а $U_{НР} = U_{РНР} = 1,1 \cdot U = 1,1 \cdot 190 = 210$ кВ.

Пример 3. Определить расчетную величину длительно допустимого напряжения на ограничителе ЗАО «Феникс - 88» 500 кВ, установленного на разомкнутом конце линии 500 кВ длиной 250 км, волновое сопротивление линии $Z_{в} = 270$ Ом, предвключенное сопротивление питающей подстанции $X_{п} = 70$ Ом, время холостого хода линии 20 мин, $E^* = 1,0$.

Воспользуемся формулой:

$$U_{к} = U_{НР} = E \cdot \frac{U_{НОМ} \cdot 1,05}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{X_{п}}{Z_{е}} \operatorname{tg} \lambda} \cdot \frac{1}{\cos \lambda};$$

$$\lambda = 0,06L = 0,06 \cdot 250 = 15^{\circ};$$

$$\text{при этом } U_{НР} = 1,0 \cdot \frac{500 \cdot 1,05}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{70}{270} \operatorname{tg} 15} \cdot \frac{1}{\cos 15} = 334 \text{ кВ.}$$

Из кривой 2 рис. 2.11 при $t = 1200$ сек определяем $K_{в} = 1,18$ поэтому, $U_{РНР} = 334/1,18 = 283$ кВ.

Из каталога ЗАО «Феникс - 88» выбираем ограничитель ОПН с $U_{РНР} = 303$ кВ.

Пример 4. Определить расчетную величину длительно допустимого напряжения на ограничителе 330 кВ ОАО «Позитрон» устанавливаемого в разомкнутом конце линии 330 кВ длиной 250 км. Волновое сопротивление линии $Z_{в} = 330$ Ом, предвключенное сопротивление питающей подстанции $X_{п} = 100$ Ом, время холостого хода линии 20 мин, $E^* = 1,05$. При этом $\lambda = 0,06 \cdot 250 = 15^{\circ}$.

Еще раз воспользуемся формулой:

$$U_{к} = U_{НР} = E \cdot \frac{U_{НОМ} \cdot 1,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{X_{п}}{Z_{е}} \operatorname{tg} \lambda} \cdot \frac{1}{\cos \lambda} = 1,05 \cdot \frac{330 \cdot 1,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{100}{330} \operatorname{tg} 15} \cdot \frac{1}{\cos 15} = 249 \text{ кВ.}$$

Из рис. 2.13 при $t = 1200$ с $K_{в} = 1,25$ $U_{РНР} = \frac{249}{1,25} = 199,2$ кВ.

Из каталога ОАО «Позитрон» выбираем ОПН-330 с $U_{НР} = 210$ кВ.

2.2. Определение других параметров, необходимых для выбора ограничителей.

Одним из основных параметров, определяющих электрические характеристики нелинейных ограничителей перенапряжений, является величина импульсного тока, допустимого через варисторы упомянутых защитных аппаратов. При значениях тока больше допустимого для выбранных варисторов может произойти их перекрытие по боковой поверхности.

Импульсные токи через ОПН обычно изучаются по ходу снятия кривых опасных волн. Методика исследования импульсных токов такова: при снятии кривых опасных волн импульсные напряжения на изоляции электрооборудования, например, силового трансформатора, увеличиваются до тех пор, пока их амплитуда не коснется уровня допустимых импульсных воздействий (на плоскости $U-t$) $U_{доп}$

$$U_{доп} = 1,1(U_{пв} - U_{ном}/2),$$

где $U_{пв}$ – полная импульсная испытательная волна, принимаемая из ГОСТ 1516.3-96 (например, для трансформатора 110 кВ $U_{пв}=480$ кВ);

$U_{ном}$ – номинальное напряжение трансформатора со стороны обмотки исследуемой сети.

При касании импульсных перенапряжений и $U_{доп}$ фиксировалась осциллограмма тока через ОПН и далее определялась амплитуда тока. Такая методика изучения импульсных токов через ОПН реализовывалась с помощью программы «ГРОЗА» для ПЭВМ, разработанной на кафедре инженерной электрофизики и техники высоких напряжений Санкт-Петербургского государственного технического университета.

Анализ показал, что величина импульсного тока через ограничители перенапряжений зависит от типа подстанции (тупиковая, проходная, многофидерная), числа и количества защитных аппаратов, их характеристик, расстояния между защищаемым оборудованием и защитным аппаратом, местом установки ОПН (на подстанции или на линии). Однако в подавляющем большинстве случаев импульсные токи не более значений, приведённых в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Амплитуды импульсных токов через ОПН 110-750 кВ

$U_{ном}$, кВ	$I_{и}$, кА	
	подстанция	линия
110	≤ 5	≤ 15
150	≤ 5	≤ 20
220	≤ 8	≤ 20
330	≤ 10	≤ 25
500	≤ 15	≤ 30
750	≤ 20	≤ 40

Коммутационные токи через ОПН являются одним из основных факторов, определяющих сечение варисторов и вольтамперную характеристику всего защитного аппарата.

Расчёт коммутационных токов I_k через ограничители перенапряжений обычно выполняется с помощью ЭВМ. Существует ряд программ для расчёта величины и формы этого тока.

При предварительном выборе ограничителей перенапряжений может быть также применена расчётная методика, разработанная в НИИПТ под руководством доктора технических наук С.С. Шура. По этой методике расчёт коммутационного тока I_k может быть выполнен по формулам [8]:

- если ОПН установлен на удалённом конце линии, то

$$I_k = (U - U_{ост}) / Z_в,$$

- если защитный аппарат установлен на питающем конце линии (на шинах питающей подстанции), то

$$I_k = \{(U - U_{ост}) / Z_в\} \cdot (1 + Z_в / \beta L_n),$$

где

U – амплитуда неограниченных перенапряжений;

$U_{ост}$ – остающееся напряжение на варисторах ОПН при токе I_k ;

$Z_в$ – волновое сопротивление провода относительно земли;

L_n – предвключенная индуктивность питающей подстанции;

$\beta = (\beta_1 + \omega) / 2$ – расчетная частота;

β_1 – наименьшая из частот свободных колебаний системы;

ω – частота вынужденной Э.Д.С.

Поскольку ток I_k в свою очередь зависит от $U_{ост}$, его значение определяется параметрами точки пересечения ВАХ ограничителя и нагрузочной кривой. Ориентировочное значение I_k для ОПН разных классов напряжения и для установки на разных объектах приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Характеристики коммутационных токов через ОПН 110-750 кВ

$U_{ном}, \text{кВ}$	$I_k, \text{А}$	
	на п/ст	на линии
110	300-500	-
150	350-500	-
220	400-600	-
330	500-700	400-600
500	800-1000	600-900
750	1200-1400	1100-1300

Для устойчивой работы ограничителей перенапряжений важно знать значение удельной энергоёмкости (в кДж на 1 кВ $U_{ном}$, $U_{нр}$ или $U_{рнр}$). В ряде случаев используют также общую энергоёмкость ограничителей. По удельной энергоёмкости все ограничители делят на 5 классов (таблица 2.4)

Таблица 2.4

Классы энергоёмкости ОПН

Классы разряда линии	1	2	3	4	5
Амплитуда прямоугольного тока длительностью 2000 мкс, А	250÷300	450÷600	900÷1000	1200÷1350	1800÷1900
Удельная энергоёмкость \mathcal{E}^* , кДж/кВ	до 2	2,5÷3,0	4,0÷4,5	7,0	10,0

Здесь нелишне отметить, что в ряде каталогов приводятся не значения амплитуды прямоугольного тока длительностью 2000 мкс (I_2), а амплитуда тока формой 1,2/2,5 $I_{1,2/2,5}$ мс и прямоугольного импульса длительностью 4 мс I_4 . Последние через I_2 могут быть выражены как

$$I_{1,2/2,5} \approx (0.7 \div 0.75)I_2; \quad I_4 \approx (0.7 \div 0.75)I_2$$

По данным [9] при установке ОПН на конденсаторных батареях поперечной компенсации или на кабельных присоединениях, энергия, погашаемая ОПН, может быть определена по формуле

$$\mathcal{E} = \frac{1}{C} \left[(3U_{нр})^2 - (\sqrt{2} \cdot 1,25U_{нр})^2 \right],$$

где C – ёмкость батареи или кабеля, Ф;

$U_{нр}$ – амплитуда наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения фаза – земля, кВ

В других случаях энергия может быть определена как

$$\mathcal{E} = \frac{U - U_{ост}}{Z} U_{ост} \cdot 2Tn,$$

где U – величина неограниченных перенапряжений, кВ,

$U_{ост}$ – остающееся напряжение на ограничителе, кВ

Z – волновое сопротивление линии, Ом;

T – время распространения волны, мкс

$$T = \frac{L}{V},$$

L – длина линии, км;

V – скорость распространения волны;

n – количество последовательных импульсов

При выборе ограничителей их характеристики должны быть согласованы с характеристиками изоляции защищаемого электрооборудования. По данным [10]

испытательные напряжения изоляции при грозовых импульсах и напряжении 50 Гц и коммутационных импульсах приведены в таблицах 2.5, 2.6, 2.7 и 2.8.

Выбор и размещение ОПН в сетях 110÷750 кВ по грозозащите определяются заданным показателем надёжности грозозащиты подстанций ($M \geq 1000$ лет).

Вообще говоря, расстояние между ОПН и защищаемой изоляцией определяется с помощью ПЭВМ или физических моделей. Этот вопрос будет рассматриваться в главе третьей. Однако эти расстояния должны быть такими, чтобы обеспечить одно из ниже приведённых двух условий:

- 1) амплитуда импульсных перенапряжений обычно на 20÷40% выше, чем остающееся напряжение ОПН;
- 2) величина перенапряжений должна быть на 15÷20% ниже испытательного напряжения.

В ряде случаев удобно пользоваться понятием допустимого уровня $U_{доп}$ грозовых перенапряжений на изоляции. Например, для силовых трансформаторов [11,12],

$$U_{доп} = 1,1(U_{пв} - U_{ном} / 2)$$

где $U_{пв}$ – испытательное напряжение полной грозовой волной;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение обмотки рассматриваемого трансформатора или автотрансформатора

Таблица 2.5

Нормированные испытательные напряжения

Класс Напряжения, кВ	Испытательные напряжения внутренней и внешней изоляции													
	Грозового импульса							Кратковременное (одноминутное) переменное						
	Полного				Срезанного			В сухом состоянии или под дождём ¹⁾						
	Силовые трансформаторы и шунтирующие реакторы	ТН, конденсаторы связи	ТТ, аппараты ²⁾	Изоляторы	Выключатели с повышенным уровнем изоляции	Выключатели без повышенного уровня изоляции	Разъединители, предохранители	Силовые трансформаторы и шунтирующие реакторы	Электромагнитные ТН	Силовые трансформаторы и шунтирующие реакторы	ТН, ТТ и конденсаторы связи, аппараты, относительно земли ²⁾	Изоляторы относительно земли	Между контактами разъединителя и предохранителя	
110	480	480	450	$\frac{450^{3)}$ 550	520	450	570	550	550	200	200	$\frac{200^{4)}$ 230	$\frac{200^{3)}$ 230	230
150	550	650	650	650	750	650	790	600	750	230	275	$\frac{275^{4)}$ 300	275	315
220	750	950	900	950	1050	900	1100	835	1100	325	395	$\frac{395^{4)}$ 440	395	460

Примечания:

- 1) Под дождём для электрооборудования категории размещения 1 (кроме силовых трансформаторов, реакторов и изоляции между контактами разъединителей).
- 2) Для аппаратов трёхполюсного исполнения – также и между полюсами.
- 3) В знаменателе для вводов, в числителе – для других изоляторов.

4) В знаменателе для испытаний в сухом состоянии аппаратов с немасляной изоляцией без проверки качества выполнения изоляции на отсутствие ЧР или другими дополнительными методами, в числителе – для остального оборудования, а также для испытания под дождём

Таблица 2.6

Нормированные испытательные напряжения электрооборудования классов 330÷750 кВ

Класс напряжения, кВ	Уровень изоляции ¹⁾	Испытательные напряжения внутренней и внешней изоляции														
		Грозового импульса						Коммутационного импульса в сухом состоянии и под дождём ²⁾								
		Полного				Срезанного		Электробо- рудо вание относите льно земли	Между фазами СТ (внутре нняя изоляция)	Между контакт ами В и Р	СТ и РШ		ЭТН	ЕТН, ТТ, изолято ры, конденс аторы связи, аппарат ы относит ельно земли	Межд у контак тами В и Р	
		СТ	ШР и ЭТН	Емко стные ТН, ТТ, изоля торы, аппар аты, конде нсато ры связи	Между контактами		СТ				ШР, ЭТН	относ итель но земли				между фазам и
		газона полнен ных выключ ателе й	разъед инител ей													
330	а	0,50	1050	1050	1255	1255	1050	1175	850	1275	950	395	525	460	460	575
	б	1050	1175	1175	1380	1450	1150	1300	950	1425	1245	460	575	460	$\frac{510^{2)}$ 560	750
500	а	1300	1425	1425	1425	1725	1400	1550	1050	1575	1330	570	80	630	630	815
	б	1550	1675	1550	1550	2050	1650	1800	1230	1845	1660	630	830	630	$\frac{680^{3)}$ 760	1030
750	а	1800	1950	195	1950	2250	1950	2100	1425	2400	$\frac{2000^{4)}$ 1675	750	110	-	830	$\frac{1250}{950}$
	б	2100	2250	2100	2100	2400	2250	2400	$\frac{1550^{3)}$ 1675	2550	$\frac{2250^{4)1}$ 800	$\frac{800^{3)}$ 900	1250	-	950	$\frac{1400}{1100}$

Примечания:

СТ – силовой трансформатор, ШР – шунтирующие реакторы, ЭТН – электромагнитные трансформаторы напряжения, ЕТН – емкостные трансформаторы напряжения, ТТ – трансформаторы тока, В – выключатели, Р – разъединители.

- 1) а – уровень изоляции при применении ОПН, б – то же при применении вентильных разрядников;
- 2) под дождём - для электрооборудования категории размещения 1 (кроме СТ, ШР и изоляции между контактами Р);
- 3) в знаменателе для ШР, в числителе – для остального электрооборудования;
- 4) в числителе - для В, в знаменателе – для Р;
- 5) в знаменателе – для аппаратов с немасляной изоляцией без проверки качества выполнения изоляции на отсутствие ЧР или другими дополнительными методами, в числителе – для остального электрооборудования.

Таблица 2.7

Нормированные испытательные напряжения изоляции нейтрали силовых трансформаторов 110÷220 кВ с неполной изоляцией нейтрали, допускающей работу с разземлением нейтрали

Класс напряжения трансформатора, кВ	Испытательное напряжение внутренней и внешней изоляции		
	Кратковременное (одноминутное) переменное		Полного грозового импульса
	Нейтрали	Ввода нейтрали в сухом состоянии и под дождём ¹⁾	Нейтрали и ввода нейтрали
110	100	110	200
150	130	145	275
220	200	230	400

Примечание: 1) Под дождём для вводов категории размещения 1.

Таблица 2.8

Нормированные испытательные напряжения для воздушных промежутков электрооборудования классов напряжения от 110 до 750 кВ

Класс напряжения	Уровень изоляции	Испытательные напряжения			
		Переменное при плавном подъёме		Коммутационного импульса	
		Относительно земли	Между фазами	Относительно земли	Между фазами
110	-	280	-	-	-
150	-	320	415	-	-
220	-	465	600	-	-
330	а	-	-	850	1275
	б	-	-	950	1300
500	а	-	-	1050	1575
	б	-	-	1230	1800
750	а	-	-	1425	2400
	б	-	-	1550	2550

Выбранный ОПН проверяется на обеспечение им требуемого защитного уровня коммутационных перенапряжений. Величина последних обычно должна быть на 15÷20% ниже испытательного напряжения изоляции коммутационным импульсом, которые нормируются для электрооборудования 330 кВ и выше.

Для электрооборудования 110÷220 кВ допустимый уровень коммутационных перенапряжений определяется нормируемым одномоментным испытательным напряжением с частотой 50 Гц с учётом коэффициента импульса при внутренних перенапряжениях ($K_{и} \approx 1,35$) [10, 11].

При коммутационных перенапряжениях в случае статистической координации изоляции остающееся напряжение ограничителя определяют из системы уравнений

$$U_{ост} = AI_k^\alpha; \quad (A)$$

$$U_{ост} = U_{max} - K_{нн} Z_B I_k; \quad (B)$$

где $U_{ост}$ – остающееся напряжение на ОПН при рассматриваемой коммутации;

$K_{нн}$ – коэффициент несимметрии, учитывающий неодновременность срабатывания ограничителей в различных фазах: $K_{нн} = 1,2 \div 1,3$;

Z_B – волновое сопротивление линии по прямой последовательности;

U_{max} – величина неограниченных перенапряжений (при отсутствии соответствующих расчётов принимают $U_{max} = 3,5 U_\phi$);

A и α – параметры ВАХ ограничителя.

Решение уравнения (Б) получают графоаналитическим способом: по уравнению (А) строят ВАХ ОПН или её часть в области около I_k , затем строят прямую $U_{MAX} - K_{нн} Z_B I_k$. Пересечение этих двух зависимостей даёт $U_{ост}$ и I_k (все решения производят в амплитудных значениях напряжения и тока).

Формулы (А) и (Б) также пригодны для выполнения расчётов для кабельных сетей, однако при этом следует иметь в виду, что Z_B для кабелей значительно меньше, чем для воздушных линий.

Для ОПН обычно нормируются значения тока срабатывания противозрывного устройства, при которых не происходит взрывного разрушения покрышки ОПН при его внутреннем повреждении.

При выборе ограничителей необходимо иметь в виду, что при токах срабатывания взрывного устройства до 40 кА, его значение должно быть на 15÷20% больше тока однофазного или трёхфазного тока короткого замыкания.

Для ОПН с токами срабатывания противозрывного устройства свыше 40 кА введение коэффициента запаса не требуется.

При работе ОПН в различных районах по загрязнению важное значение имеет правильный выбор длины пути утечки внешней изоляции в соответствии с ГОСТ 9920. При этом следует руководствоваться тем, что удельная длина пути

утечки для ОПН выбирается не менее, чем на 20% выше для остального оборудования подстанции.

Не менее важное значение имеет обоснованный выбор ОПН по механическим характеристикам. Аппараты опорного исполнения категории размещения 1 (наружная установка) должны выдерживать механические нагрузки:

- от ветра со скоростью 30 м/с;
- от ветра со скоростью 15 м/с при гололёде с толщиной стенки льда до 20 мм;
- от тяжения проводов в горизонтальном направлении не менее 500 Н для ограничителей 110÷500 кВ и 1000 Н для ограничителей 750 кВ.

При установке ОПН в районах с повышенной сейсмической опасностью (выше 7 баллов по МСC – 64) необходимо учитывать сейсмоустойчивость защитных аппаратов.

2.3 Окончательный выбор ограничителей

Окончательный выбор ограничителей производится с учётом всех электрических и неэлектрических воздействий. При этом необходимо особое внимание обратить на возможные квазистационарные перенапряжения, если на линиях установлены силовые трансформаторы или шунтирующие реакторы. Эти перенапряжения должны быть исследованы по требованиям Заказчика ограничителей.

При окончательном выборе ограничителей перенапряжений следует особое внимание уделить расстояниям между ОПН и защищаемой изоляцией. При вновь строящихся объектах это расстояние определяется расчётным путём. При замене вентильных разрядников на ОПН, расстояние от ОПН до защищаемой изоляционной конструкции может быть определено по формуле:

$$L_{\text{ОПН}} = L_{\text{РВ}} (U_{\text{исп}} - U_{\text{ОПН}}) / (U_{\text{исп}} - U_{\text{РВ}}),$$

где $U_{\text{исп}}$ – испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе (смотри таблицы 2.5 и 2.6),

$L_{\text{РВ}}$ – расстояние от защищаемого оборудования до РВ, нормируемое ПУЭ (смотри таблицы 4.2.8; 4.2.9 и 4.2.10 [13]);

$U_{\text{ОПН}}$ - остающееся напряжение на ОПН при разрядном токе 10 (5) кА;

$U_{\text{РВ}}$ - то же на вентильном разряднике при разрядном токе 10 (5) кА.

В заключении отметим, что при протекании через ограничитель импульсных токов при падении на подстанции грозových волн на заземляющем устройстве (ЗУ) подстанции в месте его присоединения возникает напряжение $U_{\text{ЗУ}} = I_p R_{\text{ЗУ}}$, где I_p – разрядный ток ограничителя, $R_{\text{ЗУ}}$ – импульсное сопротивление заземления ЗУ. Как показано в [9], перенапряжения на вторичных обмотках измерительных трансформаторов может быть приблизительно в два раза выше $U_{\text{ЗУ}}$ в месте присоединения их к ЗУ, поэтому точка присоединения ОПН должна быть как можно дальше удалена от точек заземления названных трансформаторов.

Рассмотрим пример выбора ОПН.

Пример. Выбрать ОПН ОАО «Позитрон» для установки на узловой подстанции 110 кВ и в нейтрали трансформаторов, если $I_p=7$ кА; $I_k=500$ А; $E^*=1,05$; $I_{кз}=15$ кА; район загрязнения II.

Для выбора ОПН определим $U_{нр}$ и $U_{рнр}$.

$$U_{нр} = E^* \cdot 1,15 \frac{110}{\sqrt{3}} = 76,6 \text{ кВ}. \text{ В первом приближении } U_{рнр}=U_{нр}=76,6 \text{ кВ}. \text{ В}$$

нейтрали трансформатора в нормальном режиме напряжение частотой 50 Гц ближе к нулю. Однако при несимметричных к.з. в течение $0,15 \div 0,2$ с напряжение может повышаться до фазного, то есть до 76,6 кВ. Из рис. 2.15 для $t=0,2$ с $K_B=1,43$ поэтому для ОПН, устанавливаемого в нейтрали $U_{рнр}=76,6/1,43=53,6$ кВ.

Из каталога ОАО «Позитрон» выбираем ограничитель ОПН-П-110/78/10/500 (II, III, IV) – УХЛ1 и ОПН-П-110/56/10/500 (II, III) – УХЛ1. Результаты сопоставления требуемых и фактических параметров для выбранных ОПН сведены в таблицу 2.9.

Таблица 2.9

Наименование параметра	Тип ограничителя			
	ОПН-П-110/78/10/500(II, III, IV) – УХЛ1		ОПН-П-110/56/10/500 (II, III) – УХЛ1	
	Требуемый	Фактический	Требуемый	Фактический
1	2	3	4	5
Класс напряжения, кВ	110	110	110	110
$U_{рнр}$, кВ	76,6	78	53,6	56
I_p , кА	7	10	2 ¹⁾	10
$I_k=I_{2000}$, А	500	850	150 ¹⁾	500
$U_{ост8/20}$, кВ	321÷375 ³⁾	250	200 ²⁾	180
$U_{ост30/60}$, кВ	285÷298 ⁴⁾	206	171 ⁵⁾	138
Длина пути утечки, см, не менее	163,8	270	118	251
Испытательное напряжение: полный импульс, кВ	450	335	200	330
одноминутное 50 Гц в сухом состоянии и под дождём, кВ	200	160	100	160
$I_{кз}$, кА	15	20	15	20

Примечания:

- 1) благодаря большому волновому сопротивлению обмотки;
- 2) по формуле $U_{ост}=U_{исп}$ и, так как аппарат устанавливается вблизи нейтрали;
- 3) по формуле $U_{ост} \leq \frac{U_{исп.и}}{1,2 \div 1,4}$;
- 4) по формуле $U_{ост} \leq \frac{\sqrt{2} \cdot 0,9 \cdot 1,35 \cdot U_{исп.одном.}}{1,15 \div 1,2}$;

- 5) по формуле $U_{ост} \leq \sqrt{2} \cdot 0,9 \cdot 1,35 \cdot U_{исп.одном}$, так как аппарат устанавливается вблизи нейтрали.

Как видно из этой таблицы, выбранный аппарат во всех аспектах обеспечивает защиту изоляции и собственную «живучесть».

3. Общие рекомендации по размещению ОПН.

3.1. Выбор расстояния от ОПН до защищаемого оборудования

Любой защитный аппарат имеет определённую зону защиты. Эта зона выражается расстоянием от защитного аппарата до защищаемой изоляционной конструкции (защищаемого электрооборудования). Так, например, эти расстояния в случае установки на подстанции вентильных разрядников приведены в ПУЭ [13] (таблицы 4.2.8, 4.2.9 и 4.2.10). Они продиктованы тем, что форма импульса перенапряжений на изоляции электрооборудования после срабатывания защитных аппаратов имеет сложный вид и определяется суммой аperiodической составляющей и затухающей составляющей, причём аperiodическая составляющая определяется остающимся напряжением на рабочих сопротивлениях защитного аппарата, а колебательная затухающая – крутизной входящих с линии волн, расстоянием между защитным аппаратом и защищаемой изоляцией, а также скоростью распространения волны по проводам ошиновки РУ и присоединений. В любом случае для обеспечения приемлемой величины показателя надёжности грозозащиты должен быть выдержан определённый интервал координации (например, 15÷20%). Поэтому при расстояниях, больше рекомендуемых этот интервал может сильно уменьшаться, стремясь к нулю, или даже изменить знак. В этом случае резко возрастает вероятность грозового повреждения изоляции.

Если эти расстояния при грозовых перенапряжениях составляют несколько десятков метров, то при воздействиях на изоляцию коммутационных перенапряжений они растут до сотен метров. Таким образом, при успешной организации грозозащиты в подавляющем большинстве случаев обеспечивается и защита от коммутационных перенапряжений.

При размещении ОПН на ОРУ или ЗРУ возможны два случая: 1) подстанция вновь строящаяся и не имеет типовую схему грозозащиты; 2) на подстанции происходит «простая» замена вентильных разрядников (РВ) на ОПН.

В первом случае с учётом реальной принципиальной схемы ОРУ или ЗРУ, характеристик изоляции и защитных аппаратов с помощью ПЭВМ или физических моделей [6, 13] производится исследование грозозащиты, определяются приемлемые расстояния от защитных аппаратов до электрооборудования, рассчитывается показатель надёжности грозозащиты (число лет безаварийной работы при грозовых ситуациях), который должен составлять от сотен лет до нескольких тысяч лет в зависимости от рабочего напряжения подстанции.

При замене РВ на ограничители (второй случай) расстояния от ограничителей до электрооборудования могут быть определены двумя путями:

- 1) по формуле [9]

$$L_{\text{ОПН}} = L_{\text{РВ}} (U_{\text{исп}} - \bar{U}_{\text{ОПН}}) / (U_{\text{исп}} - U_{\text{РВ}}),$$

где $U_{\text{исп}}$ – испытательное напряжение защищаемого электрооборудования при полном грозовом импульсе, кВ (смотри таблицы 2.5÷2.7),

$\bar{U}_{\text{ОПН}}$ – остающееся напряжение на ОПН при токе 5 или 10 кА, кВ;

$U_{\text{РВ}}$ – остающееся напряжение на РВ при токе 5 или 10 кА, кВ;

$L_{\text{ОПН}}$ – расстояние от ОПН до электрооборудования;

$L_{\text{РВ}}$ – то же от РВ до оборудования

2) по расстояниям $L_{\text{ОПН1}}$ для определённого ОПН-1 путём пересчёта на новый (другой) ОПН-2

$$L_{\text{ОПН2}} = L_{\text{ОПН1}} + 0,7 \frac{U_{\text{осм1}} - U_{\text{осм2}}}{2a} c, \text{ м},$$

где $U_{\text{осм1}}, U_{\text{осм2}}$ – остающиеся напряжения ОПН – 1 и ОПН – 2 при разрядных токах 5 или 10 кА,

c – скорость распространения волны,

a – средняя крутизна падающей волны, в приближённых расчётах по рекомендациям [9] a может быть определена как

$$a = \frac{U_{\text{л}}}{\tau_{\phi}},$$

где $U_{\text{л}}$ – амплитуда среднего разрядного напряжения линейной изоляции, кВ;

$\tau_{\phi} \approx 3 \text{ мкс}$

3.2 Место установки ОПН

Ограничители перенапряжения 110÷750 кВ устанавливаются:

1) в присоединениях трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих реакторов и батарей конденсаторов для защиты их изоляции от грозовых перенапряжений и перенапряжений при коммутациях: оперативных или аварийных отключениях и включениях;

2) на линиях, в том числе в их концах и ослаблённых местах (пересечения линий между собой, пересечения с железной дорогой, высокие переходы через реки и заливы, ослабление опоры линии со смешанными опорами, разъединители секционирования и т.д.) для защиты изоляции от грозовых и коммутационных перенапряжений;

- в присоединении шунтирующих реакторов с искровым присоединением для защиты их изоляции от грозовых и коммутационных перенапряжений.

- ограничители должны подключаться к проводам высокого напряжения без коммутационных аппаратов, причём спуск к заземляющим устройствам и спуск от проводов к ОПН должны выполняться теми же проводами, что и для остального оборудования ОРУ или ЗРУ.

Как отмечалось раньше, точка присоединения ограничителя к заземляющему устройству (ЗУ) должна быть максимально удалена от точек присоединения к ЗУ измерительных трансформаторов.

Сопла противовзрывных клапанов должны быть установлены так, чтобы они были расположены по продольной оси ячейки. При этих условиях

безопасное расстояние от путей обхода до ограничителя перенапряжений будет примерно соответствовать расстоянию от него до границ ячейки, требуемого директивными документами.

3.3 Условия работы ОПН на подстанциях с элегазовой изоляцией (КРУЭ)

Для защиты изоляции электрооборудования КРУЭ от перенапряжений применяют ОПН внешнего или внутреннего исполнения.

В случае установки ОПН вне КРУЭ их должны размещать в местах ввода воздушных линий в КРУЭ на расстоянии, не более 10 м от ввода. При этом спуск к ЗУ должен быть присоединён к ЗУ КРУЭ.

Достаточно часто присоединение ВЛ с КРУЭ производится кабелем или элегазовым токопроводом. В этом случае ОПН должен устанавливаться в месте перехода и его заземление должно присоединяться к оболочке кабеля или токопровода.

На присоединениях трансформаторов к сборным шинам КРУЭ через выключатели (В) между разъединителями между В и трансформатором должен быть установлен внутренний ОПН.

Анализ показывает, что ограничитель, предназначенный для внутренней установки КРУЭ, по энергоёмкости должен быть на класс разряда линии быть выше, чем ОПН для внешней установки.

3.4 Мероприятия, направленные на повышение надёжности работы ОПН

Если предполагаемые условия работы ограничителей перенапряжений несколько тяжелее, чем они рассчитаны, то можно дать рекомендации, направленные на обеспечение «живучести» упомянутых защитных аппаратов.

Эти мероприятия в упрощённой форме могут быть сведены к следующим:

- некоторое снижение напряжения с помощью РПН;
- при ненагруженных трансформаторах и автотрансформаторах на части из них установить повышенный, а на другой части – пониженный коэффициент трансформации, чтобы повысить реактивную мощность вследствие протекания уравнительного тока;
- управлять пофазно в группах шунтирующих реакторов и автотрансформаторов в ремонтных ситуациях таким образом, чтобы обеспечить неполнофазный режим;
- более широко применять четырёхлучевой реактор с соответствующей релейной защитой и автоматикой;
- на узловых подстанциях с многими силовыми трансформаторами 110÷220 кВ заземлять нейтраль через коммутационный аппарат, управляемый системой от повышения напряжения в неполнофазных режимах и коротких замыканиях большей длительностью;

- в электропередачах с автотрансформаторами 500 и 750 кВ, работающих в полублочных и блочных режимах, применять системы «разрывающие» схемы треугольника обмотки низшего напряжения;

- для трансформаторов 110÷330 кВ, работающих без коммутационной аппаратуры на стороне высшего напряжения, в режимах повышенных квазистационарных перенапряжений, применять закорачивание выключателей или короткозамыкателей на обмотку низшего напряжения, действующих от пофазной автоматики от повышения напряжения.

3.5 Вопросы эксплуатации ОПН

Любой ограничитель, выбранный в соответствии с требованиями электрических воздействий на него, ещё не обеспечивает надёжную и устойчивую работу аппарата. Если не выдержаны другие условия, на которые рассчитаны ОПН, то может произойти его повреждение. Во избежание такого нелишне рассмотреть другие факторы, влияющие на эксплуатацию ограничителей.

Температура окружающей среды может отражаться на тепловой устойчивости аппарата. Поэтому следует избегать нарушения условий температурного режима.

Большинство аппаратов, разрабатываемых и изготавливаемых различными фирмами, рассчитано на температуру окружающего воздуха от -45 до +45°С исполнения У и -60 до +45°С исполнения УХЛ. Если вблизи аппарата имеются другие источники высоких температур, то необходимо пересмотреть величину $U_{рнр}$, увеличив его на 2% для каждых 5 градусов повышения температуры.

Категория размещения по ГОСТ 15150-69 является одним из основных условий эксплуатации ОПН. При его нарушении может произойти перекрытие внешней изоляции при повреждении всего аппарата.

Высота выше уровня моря – влияет главным образом на внешнюю изоляцию ограничителей перенапряжений. Так, например, если ограничитель рассчитан на работу на открытом воздухе на высоте не более $H=1000$ м, то его эксплуатация на высотах $H>1000$ м при пониженной плотности воздуха может привести к перекрытию внешней изоляции. Поэтому при этих условиях внешняя изоляция аппарата должна быть усилена.

Условия загрязнения и общее состояние внешней изоляции имеют также немаловажное значение в надёжности работы ограничителей. Так, например, если аппарат рассчитан на удельную длину пути утечки 1,8 см на 1 кВ наибольшего рабочего линейного напряжения сети, то при других более тяжёлых условиях загрязнения, изоляция аппарата должна быть усилена.

Ограничители перенапряжений рассчитываются на определённые механические нагрузки.

Так, например, если аппарат не рассчитан на вибрации, удары и выдерживает тяжение провода в горизонтальном положении не более 500 Н и давление ветра со скоростью не более 40 м/с без гололёда и не более 15 м/с

при толщине гололёда 2 см, то при других условиях механические характеристики аппарата должны быть пересмотрены.

Если аппараты взрывоопасны и не снабжены предохранительным устройством для сброса давления, то должны быть предусмотрены мероприятия по защите другого оборудования в случае его повреждения.

Меры безопасности при монтаже и эксплуатации должна предусмотреть:

- ограничители должны удовлетворять действующим правилам техники безопасности при электромонтажных, наладочных работах и эксплуатации электроустановок (ГОСТ 12.2.007.0-75, ГОСТ 12.2.007.3-75);

- к обслуживанию должен быть допущен персонал, изучивший инструкцию и имеющий допуск к обслуживанию высоковольтных распределительных устройств

При эксплуатации ОПН должно быть принято во внимание техническое состояние аппарата. Перед монтажом необходимо произвести:

- внешний осмотр ограничителя;

- измерение сопротивления ограничителей мегомметром напряжением 2,5 кВ (при повышенной влажности окружающего воздуха измерения должны вестись с применением экрана; при этом величина сопротивления не должна отличаться больше, чем на 30% от величин, приведённых в паспорте).

После монтажа ограничителя до включения под напряжение необходимо произвести измерение тока проводимости. Так, например, для этого аппарат 110 кВ должен быть поставлен под 73 кВ, 50 Гц, остальные ОПН – 100 кВ, 50 Гц (при 150 кВ и выше) – при отсутствии соответствующего электрооборудования допускается производить измерение тока проводимости ограничителей 220 кВ при напряжении 75 кВ. При этом величина тока проводимости не должна отличаться более, чем на 20% от значений, измеренных на предприятии – изготовителе и приведённых в паспорте.

Допускается проводить измерение тока проводимости с помощью миллиамперметра постоянного тока. При этом значение тока проводимости ~10% ниже, чем измеренное миллиамперметром переменного тока под рабочим напряжением.

Диапазоны допустимых значений тока проводимости, протекающего через высоколинейные варисторы аппарата, обычно находятся в пределах, приведённых в таблице 2.10

Таблица 2.10

Ограничитель	U _{нр}	Ток проводимости, мА (действующее значение)
ОПН-110	73	0,4÷0,65
ОПН-150	100	0,5÷0,8
ОПН-220	146	0,6÷0,9
ОПН-330	210	1,1÷1,5
ОПН-500	303	1,8÷2,8
ОПН-750	455	3,0÷4,0

В случае отклонения напряжения сети от значения наибольшего рабочего напряжения $U_{нр}$ следует проводить пересчёт тока проводимости по формуле

$$I_{U_{нр}} = I_U \frac{U_{нр}}{U},$$

где $I_{U_{нр}}$ – ток проводимости при наибольшем рабочем напряжении сети, мА_{действ.};

I_U – измеренный ток проводимости, мА_{действ.};

U – напряжение сети в момент измерений тока, кВ_{действ.};

$U_{нр}$ – наибольшее рабочее напряжение

В случае отклонения температуры, при которой производят измерение тока проводимости, от величины нормальной температуры окружающей среды следует производить пересчёт тока проводимости по формуле:

$$I_{T0} = \frac{I_T}{1 + k_T(T - T_0)}, \quad \text{мА}_{\text{действ.}}$$

где I_{T0} – ток проводимости при нормальной температуре окружающей среды;

T_0 – нормальная температура окружающей среды ($T_0=293\text{К}$);

I_T – ток проводимости при температуре окружающей среды T ;

$k_T = 0.0018$ В/град – температурный коэффициент нелинейных варисторов при напряжении длительного эксплуатационного режима

Если измеренное значение тока проводимости достигает величин приведённых в таблице 2.11, то ограничитель должен быть снят с эксплуатации. Если величина тока утечки достигает 75÷80% от приведённых в таблице 2.11, то необходимо ставить вопрос о замене ограничителя. При этом необходимо иметь в виду, что это изменение не вызвано внешними факторами.

Таблица 2.11

Тип ограничителя	ОПН-110	ОПН-150	ОПН-220	ОПН-330	ОПН-500	ОПН-750
Ток проводимости при $U_{нр}$, мА _{действ.}	1,2	1,5	1,8	3,0	4,5	6,0

Техническое обслуживание ограничителей, находящихся в эксплуатации, включает:

- внешний осмотр;
- чистку изоляции;
- восстановление защитных покрытий;
- проверку болтовых соединений;
- измерение тока проводимости.

При внешнем осмотре всех типов ограничителей следует обратить внимание на целостность крышки и состояние мембраны. Защитное покрытие мембраны при необходимости следует восстанавливать.

Техническое обслуживание ограничителей следует проводить в сроки, установленные для остального электрооборудования подстанции.

ПРАВИЛА ХРАНЕНИЯ

Ограничители следует хранить в горизонтальном положении, под навесом – в таре, на открытом воздухе – в распакованном виде.

При длительном хранении необходимо периодически восстанавливать защитное лакокрасочное покрытие и консервацию.

При хранении ограничителей следует руководствоваться указаниями маркировочных знаков на таре.

ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ

Ограничители следует транспортировать в горизонтальном положении.

Тару с ограничителями опускать на землю плавно, без толчков. При транспортировании ограничителей и погрузочно-разгрузочных работах следует руководствоваться указаниями маркировочных знаков на таре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящее время нашей промышленностью прекращено производство вентильных разрядников, необходимых для защиты от перенапряжений в сетях 110 кВ и выше.

2. В стране осуществляется массовый переход к новейшим защитным аппаратам – нелинейным ограничителям напряжений, имеющим относительно лучшие электрические, а в ряде случаев – массо-габаритные характеристики. С внедрением ОПН в некоторых сетях классов напряжения 110÷220 кВ, впервые появляются активные аппаратные средства защиты от внутренних перенапряжений.

3. Необоснованный выбор характеристик ОПН, их неправильная эксплуатация могут привести к повреждению самих защитных аппаратов, вызвать серьезные аварии в энергосистемах и электрических сетях промышленных предприятий.

4. Сделана попытка облегчить труд работников энергосистем и энергетиков промышленных предприятий в выборе ОПН, их размещения в сетях, а также эксплуатации

Пособие требует доработки, дальнейшего усовершенствования с привлечением сотрудников энергосистем, промышленных предприятий, Госэнергонадзора Российской Федерации, отраслевых институтов Минтопэнерго, вузов страны, заводов-изготовителей.

Список использованной литературы

1. Иманов Г.М., Розет В.Е., Халилов Ф.Х., Колычев А.В. Опыт эксплуатации аппаратов 110 кВ и выше, выпускаемых АООТ «Корниловский фарфоровый завод». В кн. «Эксплуатация, качество и надёжность вентильных разрядников и серийно изготавливаемых ОПН 110 кВ и выше» Санкт-петербург 25-27 марта 1997.
2. Информационное письмо №42-04-04/546 от 15.10.97. Главного управления государственного энергетического надзора («Главгосэнергонадзор России»).
3. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений /Под научной редакцией Н.Н.Тиходеева, 2-ое издание. Санкт-Петербург Изд. ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.
4. Международная электротехническая комиссия. Публикация МЭК 99-4. Первая редакция.1991-11. Международный стандарт. Ограничители перенапряжений. Часть 4: Металлооксидные ограничители перенапряжений без искровых промежутков для электрических сетей переменного тока.
5. Костенко М.В., Богатенков И.М., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Квазистационарные перенапряжения в энергосистемах. Учебное пособие. Изд. ЛПИ им. М.И. Калинина, Ленинград, 1987.
6. Половой И.Ф., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения, Энергия, ЛО, 1975.
7. Половой И.Ф., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения, Энергия, ЛО, 1986.
8. Тиходеев Н.Н., Шур С.С. Изоляция электрических сетей (методика выбора, статистической координации и приведения к норме), ЛО, энергия, 1979.
9. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110÷750 кВ РАО «ЕЭС России», Москва, 2000.
10. ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. Межгосударственный стандарт. Издание официальное.

Мжгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации.
Минск.1998.

- 11.Техника высоких напряжений. Под редакцией Г.С. Кучинского
Энергоатомиздат, ЛО, 2003.
- 12.Техника высоких напряжений. Под редакцией М.В. Костенко. Высшая
школа, 1975.
- 13.ПУЭ. Минэнерго СССР, 6-ое изд., перераб. И доп. М., Энергоатомиздат,
1985.
- 14.техника высоких напряжений. Под редакцией Г.С. Кучинского.
Издательство ПЭИПК Митопэнерго. РФ, 2001.

