РАО "ЕЭС РОССИИ"

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 110-750 кВ

МОСКВА 2000

Разработано:
ОАО "Институт "Энергосетьпроект"", ОАО ВНИИЭ, НТК "ЭЛ-ПРОЕКТ".

Исполнители:
Ю.И.Лысков, Н.П.Антонова, О.Ю.Демина, А.В.Зуева -
ОАО "Институт Энергосетьпроект";
К.И. Кузьмичева - ОАО ВНИИЭ.
При участии В.Н Подъячева - АО ТЭП,
А.Г.Тер-Газаряна, Ю.И.Грабовского – НТК "ЭЛ-ПРОЕКТ".

Утверждено: Департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО "ЕЭС России" 30.09.99г.

Согласовано: Департаментом электрических сетей РАО "ЕЭС России".

Предложения и замечания просим направлять по адресу:
105058 Москва, ул. Ткацкая, д.1 ,ОАО "Институт Энергосетьпроект"

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ПРИМЕНЕНИЮ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Подготовлено к печати:
НТК "Эл - Проект"
Компьютерная верстка Грабовский Ю.И.

Тираж 500 экз.
Типография "С.ПРИНТ"
Москва, Сиреневый б-р, 4

РАО «ЕЭС России»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 110–750 кВ

МОСКВА, 2000г.

Содержание

1. ВВЕДЕНИЕ. 3

2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ. 5

3. ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПН. 8

3.1. Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН. 8
3.2. Выбор класса энергоемкости ОПН. 9
3.3. Выбор ОПН по условиям работы в квазиустановившихся режимах. 10
3.4. Выбор номинального напряжения ОПН. 15
3.5. Определение защитного уровня ограничителя при коммутационных перенапряжениях. 17
3.6. Определение защитного уровня ОПН при грозовых перенапряжениях. 19
3.7. Выбор ОПН по условиям обеспечения взрывобезопасности....21
3.8. Выбор длины пути утечки ОПН. 22
3.9. Особенности выбора ОПН по условиям работы в ОРУ электростанций. .22
3.10. Выбор ОПН по механическим характеристикам. 23

4. ПРИМЕНЕНИЕ И МЕСТО УСТАНОВКИ ОПН....25

5. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ОПН ПО УСЛОВИЯМ РАБОТЫ В КРУЭ. 27

6. СХЕМНО - РЕЖИМНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ОГРАНИЧИТЕЛЯ. 28

7. ПРИМЕРЫ ВЫБОРА ОПН. 30

ЛИТЕРАТУРА. 37

РИСУНКИ. 38

ПРИЛОЖЕНИЯ. 50

Приложение 1 50
Приложение 2 51
Приложение 3 52
Приложение 4 53
Приложение 5 54
Приложение 6 55
Приложение 7 56
Приложение 8 57
Приложение 9. 59
Приложение 10. 66
Приложение 11. 68

1. Введение.

Необходимость создания методического документа, определяющего выбор параметров ограничителей 110–750 кВ в зависимости от условий их применения для защиты оборудования 110–750 кВ от грозовых и коммутационных перенапряжений, обусловлена следующими причинами:

- В России заводы прекратили выпуск разрядников, перейдя на выпуск ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН), отличающихся от разрядников отсутствием искровых промежутков и высокой нелинейностью рабочих резисторов (варисторов). Энергия, которая поглощается ограничителем при коммутациях, грозовых и иных воздействиях в различных режимах (повышения напряжения в рабочих режимах, квазиустановившиеся и резонансные перенапряжения) не должна превосходить нормируемую для него величину. В противном случае наступает нарушение термической устойчивости и повреждение аппарата.
- В настоящий момент в России в электрических сетях 110–750 кВ применяются ОПН различных фирм, производящих их как на основе собственных конструкторских решений, так и по лицензиям международных электротехнических концернов. Комплектация ОПН осуществляется варисторами различных производителей, с отличающимися коэффициентами нелинейности.

Поэтому ОПН разных производителей, предназначенные для применения в одном классе напряжения, имеют характеристики несколько отличающиеся друг от друга. При этом ряд фирм имеет в своей номенклатуре по несколько типов и модификаций ОПН в одном классе напряжения.

Для того чтобы ОПН выполнял свои функции по защите от перенапряжений оборудования 110–750 кВ и не повреждался, необходимо определить возможные воздействия в месте его установки и в соответствии с ними выбирать тип и параметры аппарата.

Неучет всех возможных воздействий явился причиной повреждения ряда ОПН в сетях 110–750 кВ.

Настоящие "Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110–750 кВ" (далее Указания), определяют выбор типа и основных параметров ограничителей в сетях 110–750 кВ с учетом схем и режимов работы, релейной защиты и противоаварийной автоматики, а также надежности работы электрооборудования и коммутационной аппаратуры.

Порядок действий при выборе ОПН, изложенный в настоящих Указаниях, может применяться при выборе ОПН любой фирмы. В качестве справочного материала в Приложениях 2–6 приведены основные характеристики ОПН, выпускаемых различными производителями по согласованным с РАО "ЕЭС России" техническим условиям. [1]

[1] К началу 2000г. РАО "ЕЭС России" рекомендованы к применению по согласованным техническим условиям ОПН следующих фирм: ЗАО"Феникс-88", ЗАО СП "АББ-УЭТМ", ООО "Таврида-электрик" и часть номенклатуры НПО "Электрокерамика" (включая АООТ "КФЗ"). Кроме этих фирм на территории России занимаются производством ОПН 110–750кВ: АО ХК "Московский электрозавод", ООО "АФ-Полимер", Siemens и Gec Alcthom.

2. Основные положения.

Ограничитель перенапряжений нелинейный (ОПН) является одним из основных элементов подстанции, обеспечивающим защиту оборудования распределительного устройства (РУ) и линий от коммутационных и грозовых перенапряжений.

Настоящие Указания предназначены для использования персоналом проектных и эксплуатационных организаций РАО "ЕЭС России" и АО-энерго для определения характеристик и выбора по ним типа ограничителя перенапряжений по условиям его работы в заданной точке электрической сети 110–750 кВ при плановой замене разрядников, техперевооружении, реконструкции и проектировании новых РУ.

Настоящие Указания не распространяются на выбор ОПН, устанавливаемых на линии электропередачи параллельно гирляндам изоляторов для защиты изоляции линии от коммутационных и грозовых перенапряжений.

В настоящем документе использована следующая терминология (на английском языке приведены названия терминов, используемые в материалах МЭК и зарубежных фирм):

2.1. Наибольшее рабочее напряжение сети (фазное), определяется в соответствии с ГОСТ 721 и 1516.3. Обозначение – $U_{нр}$.

2.2. Наибольший уровень напряжения сети в точке установки ОПН в нормальных режимах – (maximum system voltage – U_m) – наибольшее значение действующего фазного напряжения промышленной частоты в нормальных режимах в точке установки ОПН. Определяется как наибольшее возможное фазное напряжение сети, полученное на основе замеров или расчетов по [1] для режимов суточного минимума нагрузки во время летнего минимума с учетом вывода в ремонт средств компенсации реактивной мощности на подстанции. Обозначение – $U_{нс}$, кВ действ.

2.3. Длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя – (continuos operating voltage – U_c) – наибольшее значение действующего напряжения промышленной частоты, которое не ограничено долго может быть приложено между выводами ограничителя. Обозначение – $U_{нро}$, кВ действ.

2.4. Временно допустимое повышение напряжения на ограничителе – наибольшее действующее значение напряжения, которое может быть приложено между выводами ограничителя в течение заданного изготовителем времени без сокращения его нормируемого срока службы. Обозначение – $U_{вно}$, кВ действ.

2.5. Номинальное (расчетное) напряжение ограничителя – (rated voltage – U_r) – наибольшее допустимое действующее значение напряжения промышленной частоты на выводах ОПН, используемое при рабочих испытаниях и определяющее его работу при квазиустановившихся перенапряжениях. Обозначение – $U_н$, кВ действ. По стандарту МЭК 99-4 ОПН должны выдерживать эту величину в течение 10 с после предварительного нагрева до 60° и воздействия 2-х импульсов тока, соответствующих классу удельной энергоемкости данного типа ограничителя.

2.6. Коммутационные перенапряжения – перенапряжения, существующие во время переходных процессов при коммутации элементов сети, сопровождающих внезапное изменение ее схемы или режима. Обозначение – $U_к$, кВ макс.

2.7. Квазиустановившиеся (квазистационарные) перенапряжения – (temporary overvoltage – TOV) – перенапряжения, возникающие после окончания переходного процесса при коммутации элементов сети и существующие до тех пор, пока не будут устранены специальными мерами или самоустранены. Обозначение – $U_у$, кВ действ.

К этим перенапряжениям также относятся резонансные и феррорезонансные перенапряжения на промышленной частоте, низших и высших гармониках, перенапряжения с медленно изменяющейся вследствие затухания или изменения параметров системы (например, ЭДС и индуктивностей генераторов) частотой или амплитудой.

2.8. Остающееся напряжение при нормируемом токе коммутационных перенапряжений – напряжение на ограничителе при нормируемом токе коммутационных перенапряжений. Обозначение – $U_{остки}$, кВ макс.

Нормируемая форма волны импульса тока – 30/60 мкс, либо 1,2/2,5 мс.

2.9. Остающееся напряжение при нормируемом токе грозовых перенапряжений – напряжение на ограничителе при протекании нормируемого тока грозовых перенапряжений. Обозначение – $U_{остгр}$, кВ макс, ток в кА.

Нормируемая форма волны тока в России и по стандарту МЭК – 8/20мкс, нормируемые амплитуды – 3, 5, 7, 10, 15 и 20 кА в зависимости от класса напряжения ограничителя.

2.10. Энергоемкость ограничителя – значение энергии, поглощаемой ограничителем в переходном процессе.

Энергоемкость ОПН определяется по одному нормируемому испытательному импульсу тока.[1]

Энергоемкость ограничителя является характеристикой, отражающей совокупность воздействий на него в различных режимах при напряжениях выше $U_{нро}$.

2.11.Класс энергоемкости ОПН характеризуется величиной удельной поглощаемой энергии кДж на 1кВ номинального напряжения ($U_н$) или длительно допустимого рабочего напряжения ОПН ($U_{нро}$.)

2.12.Ток срабатывания противовзрывного устройства – это значение тока однофазного или трехфазного (большего их них) короткого замыкания ($I_{кз}$, кА), при которой не происходит взрывного разрушения покрышки ограничителя. Если покрышка ограничителя все же будет повреждена, то ее элементы должны находится внутри нормируемой зоны.

[1] Нормируемые форма и длительность волны тока:
- НПО "Электрокерамика" – 1,2/2,5 мс;
- ЗАО"Феникс-88", ООО"Таврида-Электрик", ООО"АФ-Полимер" – прямоугольная длительностью 2 мс;
- СП ЗАО "АББ-УЭТМ" – прямоугольная длительностью 4 мс и 2 мс.

3. Выбор электрических характеристик ОПН.

К основным параметрам ограничителя относятся: наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, номинальное напряжение, класс энергоемкости, уровни остающегося напряжения при коммутационном и грозовом импульсе, величина тока срабатывания противовзрывного устройства, длина пути тока утечки внешней изоляции.

Учитывая, что выбор ОПН производится среди аппаратов различных фирм с сильно отличающимися характеристиками, рекомендуется сначала провести выбор по пп. 3.1 и 3.7., что в ряде случаев позволит отсеять часть производителей, а затем производить выбор в соответствии с пп. 3.2.–3.6.

3.1. Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН.

3.1.1. Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН должно быть не ниже наибольшего рабочего напряжения сети ($U_{нр}$), нормируемого ГОСТ 721.

3.1.2. Если $U_{нс}$ больше или равно $U_{нр}$, то выбирают ближайшее большее значение $U_{нро}$.

3.1.3. Повышения напряжения, возникающие при оперативных переключениях или аварийных режимах, учитываются в соответствии с п.3.3.

3.1.4. Во всех случаях для повышения надежности выбирают ограничители с наибольшим длительно допустимым рабочим напряжением ($U_{нро}$) не менее, чем на 2–5% выше наибольшего уровня напряжения сети в точке установки ОПН ($U_{нс}$.)

3.1.5. При возможности устойчивого существования высших гармоник в нормальных режимах в месте установки ОПН поступают следующим образом:

- если измерены амплитуды напряжений основной частоты и гармоники, то наибольший уровень напряжения сети в точке установки ОПН в нормальном режиме принимают равным их сумме.

- если амплитуда гармоники неизвестна, то наибольший уровень напряжения сети в точке установки ОП в нормальном режиме принимают равным 1,1 от наибольшего рабочего напряжения сети.

3.1.6. Устойчивое существование высших гармоник в сети возможно в следующих случаях:

- на подстанциях электрической сети, примыкающих непосредственно или через короткие линии к подстанциям с преобразователями постоянного тока;

- в послеаварийных режимах питания тупиковых ПС с резистивной нагрузкой (осветительной, нагревательной и т.п.) меньше 0,1 от натуральной мощности ($P_{нат}$), передаваемой по питающей линии длиной 180–350 км. Натуральную мощность линии определяют по формуле:

$$P_{нат} = U^2_{ном} / Z_1, \qquad (1)$$

где Z_1 - волновое сопротивление линии по прямой последовательности.

3.2. Выбор класса энергоемкости ОПН.

3.2.1. Практическим критерием оценки энергоемкости ОПН является его способность пропускать нормируемые импульсы тока коммутационного перенапряжения без потери рабочих качеств.

В технической информации или ТУ производители обычно приводят значение удельной энергоемкости в кДж на 1 кВ номинального или длительно допустимого рабочего напряжения ОПН. Так как разница между $U_н$ и $U_{нро}$ у большинства производителей составляет около 25%, то при одинаковых значениях удельных энергоемкостей полные энергоемкости будут отличаться на 25%.

Поэтому для сравнения характеристик и анализа термической устойчивости ОПН различных производителей к совокупности всех воздействий используют общую энергоемкость ограничителя. Значения энергоемкостей ОПН 110–750 кВ, выпускаемых по согласованным с РАО "ЕЭС России" техническим условиям, приведены в Приложениях 2–6.

По энергоемкости выпускаемые ограничители делят на несколько классов (см. табл.1).

Таблица 1.

Классы энергоемкости ОПН

Удельная энергоемкость $U_н$, кДж/кВ	До 2,0	2,5–3,0	4,0–4,5	7,0	10,0
Амплитуда прямоугольного тока длительностью 2000 мкс, А[1]	250–300	450–600	900–1000	1200–1350	1800–1900
Класс разряда линии	1	2	3	4	5

[1] Амплитуда испытательного импульса тока 1,2/2,5 мс или прямоугольного длительностью 4 мс на 25–30% меньше.

3.2.2. С увеличением класса энергоемкости стоимость ОПН возрастает. При отсутствии специальных указаний по выбору класса энергоемкости выбирают наиболее экономичный и проводят его проверку на соответствие условиям эксплуатации по пп.3.3.–3.7.

3.2.2.1. При возможности возникновения переходного резонанса (при отсутствии выключателей на стороне ВН, коммутациях блока линия–трансформатор) на 2-й или 3-й гармонике (см п.3.3.5.), при установке в сетях 110 кВ с частично разземленными нейтралями трансформаторов (см.п.3.3.6.) ограничитель должен иметь энергоемкость не ниже 4,0–4,5 кДж/кВ номинального напряжения.[2]

3.2.2.2. При установке ограничителя на шунтовых конденсаторных батареях или кабельных присоединениях энергия, поглощаемая ОПН, может быть рассчитана по формуле:

$$W = \frac{1}{C}\left[(3 \times U_{н.р.})^2 - (\sqrt{2} \times 1{,}25 \times U_{про})^2\right], \qquad (2)$$

где:

C – емкость батареи или кабеля, Ф,

$U_{н.р}$ – амплитуда наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения фаза-земля, кВ.

3.3. Выбор ОПН по условиям работы в квазиустановившихся режимах.

3.3.1. Выбранный ограничитель проверяется на соответствие его временных допустимых повышений напряжений квазиустановившимся перенапряжениям при различных видах коммутаций с учетом времени действия релейной защиты, линейной и противоаварийной автоматики. Нормируемые техническими условиями зависимости $U_{вно}$ от их допустимой длительности приводятся или в табличном виде для различных времен (Приложения 3, 5) или в виде линейных зависимостей "напряжение промышленной частоты–время" в полулогарифмическом масштабе. При этом ряд производителей приводит такие характеристики как для случая "с предварительным нагружением" аппарата коммутационным импульсом (прямая *А* рис.1–4 и рис.6,7), соответствующим энергоемкости ОПН, так и

[2] Необходимо иметь ввиду, что некоторые производители в ТУ указывают невозможность применения выпускаемого аппарата в таких схемах ввиду его малой энергоемкости (например, АООТ КФЗ), а некоторые – нет (например, ООО "Таврида-Электрик").

без предварительного нагружения коммутационным импульсом (прямая *В* рис.1–4 и рис.5).

3.3.2. Расчетными для определения U_y являются следующие коммутации:

3.3.2.1. Для ограничителей, устанавливаемых на шинах или трансформаторах (автотрансформаторах), которые по схеме ОРУ не коммутируются вместе с линией, или коммутируются с линией длиной не более 50км, определяющими являются квазиустановившиеся перенапряжения на неповрежденных фазах при несимметричном КЗ на шинах подстанции. Перенапряжения в этом случае определяют либо путем расчета по соответствующей программе, либо по Приложению 10, при этом $Z_{вх1}$ и $Z_{вх0}$ определяют как эквивалентные сопротивления для определения токов трехфазного и однофазного КЗ на шинах. Так как при эффективном заземлении нейтрали отношение $Z_{вх0}/Z_{вх1} \leq 3{,}0$, то в этом случае $U_y \leq 1{,}4U_ф$.

3.3.2.2. Для ограничителей, устанавливаемых на линии, шунтирующем реакторе на линии или на присоединенных непосредственно к линии (без выключателей) трансформаторах:

- трехфазное одностороннее отключение однофазного КЗ на противоположном конце линии;
- трехфазное одностороннее отключение линии при действии автоматики прекращения асинхронного хода;
- неполнофазные режимы одностороннего включения или отключения линии с подключенными к ней шунтирующими реакторами, автотрансформаторами или трансформаторами. К этому случаю относится также неполнофазное включение или отключение линии при выводе в ремонт или отказе линейного выключателя на подстанции с выключателями, если при действии УРОВ или по режиму линии отключаются все смежные присоединения, в том числе и на более низком напряжении автотрансформатора или трансформатора.

Наибольшие квазиустановившиеся перенапряжения бывают в несимметричных режимах:

- одностороннего отключения несимметричного КЗ вследствие каскадного действия релейных защит;
- неполнофазного включения и отключения линии, в том числе и с учетом действия УРОВ, вследствие отказа фаз коммутируемого выключателя.

3.3.3. Значения квазиустановившихся перенапряжений указанных в пп.3.3.1. и 3.3.2. режимов определяют либо путем расчета по соответствующим программам с использованием ПЭВМ, либо, при их отсутствии, путем расчета в соответствии с методикой Приложения 10.

В Приложении 8 и на зависимостях рис. 8–11 приведены значения квазиустановившихся перенапряжений, определенные для следующих случаев:

- при отключении однофазного короткого замыкания (КЗ) на конце ВЛ 500 кВ в зависимости от длины линии, параметров энергосистемы и числа включенных шунтирующих реакторов – таблица 1 Приложения 8;
- при неполнофазных коммутациях на линиях 500 и 750 кВ с шунтирующими реакторами – таблица 2 Приложения 8;
- при неполнофазных режимах линий 110, 220, 500 и 750 кВ с трансформаторами или автотрансформаторами на конце – таблица 3 Приложения 8.

При установке ОПН в точках, не входящих в расчетные случаи Приложения 8, используют приведенные там указания по интерполяции и экстраполяции имеющихся результатов.

3.3.4. Длительность существования квазиустановившихся перенапряжений (t_y) зависит от вида установившегося режима.

3.3.4.1. Для коммутации одностороннего отключения однофазного КЗ принимают длительность квазиустановившихся перенапряжений равной времени каскадного отключения линии по ее концам при действии первых и последних ступеней линейных и трансформаторных релейных защит. Значение средней длительности квазиустановившихся перенапряжений в этих режимах – 4,0 с.

3.3.4.2. При трехфазном отключении асинхронного хода время существования режима – от 0,5–1,0 с при действии второй ступени автоматики от повышения напряжения с уставкой по напряжению 1,2–1,3, до 5–10 с при действии ее первой ступени с уставкой 1,1 от $U_ф=U_н / \sqrt{3}$.

3.3.4.3. Для бестоковой паузы ОАПВ линии с реакторами, во время которой развиваются резонансные перенапряжения, их длительность принимается равной 1–2 с в соответствии с выбранной паузой.

3.3.4.4. При неполнофазных коммутациях линии с подключенными к ней трансформаторами или автотрансформаторами длительность режима принимается равной времени действия устройства резервирования отказа выключателей (УРОВ) или защиты от непереключения фаз и коммутации выключателей, действующих от резервирующих защит.

3.3.5. Для схем, в которых линия может коммутироваться вместе с автотрансформатором или трансформатором, учитывается возможность возникновения медленно затухающих колебаний напряжения (переходный резонанс на 2-й или 3-ей гармонике), в том числе и в неполнофазных схемах. Условием их появления является близость расчетной частоты свободных колебаний в схеме прямой последовательности, определяемой по [2] или Приложению 10, к двойной или тройной от промышленной. Область заметного проявления гармоник лежит в пределах отклонений

частоты свободных колебаний от -20 до +10% от промышленной частоты. Время существования достигает от нескольких десятых долей до нескольких секунд или даже минут и тем больше, чем ближе частота свободных колебаний в указанных пределах к двойной и меньше активные потери в схеме (только в активных сопротивлениях элементов сети и цепей потребителей). При малых потерях и частоте свободных колебаний, очень близкой к двойной или тройной (+5%), возможен устойчивый резонанс на 2-й или 3-ей гармонике.

Возможность возникновения и длительность затухания переходного резонанса на высших гармониках зависит от величины активного сопротивления линии, величины и удаленности от шин или трансформаторов, питающих линию, резистивной нагрузки в энергосистеме.

В схемах, питаемых от выделенных автоматикой генераторов, и суммарной активной (резистивной) нагрузкой меньше 0,05 от натуральной мощности в послеаварийных режимах возможен устойчивый резонанс на 2-ой или 3-ей гармонике с установившимися перенапряжениями не более 1,4–1,6 $U_ф$.

Для определения возможности возникновения переходного резонанса на 2-й или 3-й гармонике рассчитывают частотные характеристики схемы согласно Приложению 10.

Величину напряжения при переходном резонансе на высших гармониках можно учесть, добавляя к U_y рис.8–11 величину 0,30 в зоне длин линии 75–250 км. Время существования такого режима принимается равным 0,3с, 0,5с и 0,7–0,8с соответственно для линий 110–154, 220–330 и 500–750 кВ. При симметричной коммутации линии аналогичные условия учитываются для длин линии 150–350 км.

Во всех случаях возможного появления высших гармоник рекомендуется применять ограничители с более высоким значением наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения либо более высокого класса энергоемкости (например, ОПН серии Exlim класса Р или Т).

Неполнофазные коммутации линии с подключенными трансформатором или автотрансформатором при отказе выключателей между линией и трансформатором в схемах ОРУ "квадрат", "треугольник", "мостик", "одинарная система шин", "шины–трансформатор", "полуторная" требуют применения ограничителей с более высоким значением наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения либо более высокого класса энергоемкости.

3.3.6. В сетях 110 кВ особым случаем является неполнофазная коммутация линии с подключенными к ней трансформаторами с разземленными нейтралями на отдельных ПС при сохранении эффективного заземления нейтрали сети. Наиболее часто неполнофазные

коммутации возникают при отказах фазы выключателя при включении или отключении линии головным выключателем, реже – при обрывах проводов фазы ВЛ или ее отпаек, выпадении шлейфов на анкерных опорах и т.п. В этом случае возникают повышения напряжения, обусловленные последовательным включением индуктивных сопротивлений намагничивания фаз трансформатора и емкости оборванной фазы ВЛ. Величина этих повышений напряжений может быть достаточно высокой.

На рис.12 приведены обобщенные зависимости (в о.е.) фазного напряжения на линии $U_{ФЛ}$ и напряжения на нейтрали трансформатора U_N от тока намагничивания трансформатора I_μ с разземленной 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:

$$U^*_{ФЛ} = I_{\mu н} \times I^*_{\mu н} / Y \times L \times U_{ФН}, \text{ о.е} \qquad (3)$$

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

L – длина линии, 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.12;

$U_{ФН}$ – номинальное напряжение трансформатора, кВ.

Пересечение построенной прямой $U_{ФЛ}$ с обобщенными зависимостями $U_{ФЛ}$ дает значение установившегося перенапряжения на линии и соответствующее ему значение напряжения на нейтрали U_N.

Эти перенапряжения могут существовать несколько часов. Поэтому по зависимостям "допустимые напряжения – время" (рис.1–7) для длительности 10000 сек (с учетом условий грозозащиты) определяют значение временно допустимого напряжения $U_{вно}$.

На тупиковых подстанциях 110 кВ без обслуживающего персонала при наличии трансформаторов с нормальной изоляцией нейтрали по ГОСТ 1516.3-96 (см.п.3.5.1.) и с разземленной нейтралью в фазах рекомендуется устанавливать ОПН в зависимости от длины примыкающей линии. Это могут быть, например, ОПН серии Exlim ЗАО СП "АББ-УЭТМ" или других фирм (ЗАО "Феникс-88") с аналогичными характеристиками:

- при длине свыше 10 км – например, ОПН серии Exlim T-162;
- при длинах 5 – 10 км – например, ОПН серии Exlim Q-144;
- при длинах 1,5 – 5 км – например, ОПН серии Exlim Q-132
- при длинах до 1,5 км – ОПН серии Exlim Q-108.

Во всех остальных случаях выбор ОПН осуществляют в соответствии с приведенной выше методикой.

Для приведенных выше типов ОПН проводят проверку по п.3.5. и 3.6.. Если эти условия не выполняются, то выбирают ОПН следующего класса энергоемкости с тем же номинальным напряжением.

3.3.7. При установке ограничителя на шинах РУ или их секциях с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями с достаточно большими величинами емкостей шунтирующими его контакты (ВВБ, ВВБК, ВВБУ, ММО, ВМТ), производят расчет резонансных U_y согласно [9] и выбирают средства их ограничения. Полученные в этом случае U_y не учитываются при выборе ограничителя, так как опасны для всего оборудования ОРУ.

3.4. Выбор номинального напряжения ОПН.

3.4.1. Определенные выше величины квазиустановившихся напряжений (U_y) и соответствующие им длительности (t_y) следует сопоставить с характеристикой "повышение напряжения – время" для случая с "предварительным нагружением энергией" для выбранного типа ограничителя.

Из всех полученных по п.3.3. квазиустановившихся напряжений и их длительностей выбирают наибольшее U_{y1} и соответствующее ему значение t_{y1}, а также наибольшую длительность квазиустановившегося напряжения t_{y2} и соответствующее ей значение U_{y2}.

По зависимости "допустимое повышение напряжения–время" случая "с предварительным нагружением энергией" определяют для t_{y1} и t_{y2} соответствующие им значения T_{r1} и T_{r2} (значение $U_{вно}$ в относительных единицах). По ним рассчитывают значения номинального (или длительно допустимого рабочего) напряжения ОПН как:

$$U_{н1} = U_{y1} / T_{r1}, \text{ кВ},$$
$$U_{н2} = U_{y2} / T_{r2}, \text{ кВ} \qquad (4)$$

Для наибольшего из полученных значений $U_{н1}$ и $U_{н2}$, в Технических условиях (или Приложениях 2–6) для рассматриваемого типа ограничителя находят ближайшее большее значение номинального напряжения ОПН $U_{но}$ и соответствующее ему наибольшее рабочее длительно допустимое напряжение $U_{нро}$.

3.4.2. Определяют достаточность параметров выбранного ОПН условиям работы в квазиустановившихся режимах, определенных в соответствии с п.3.3.

Для этого определяют временно допустимую длительность $t_{внoi}$ для всех (от 1 до n) полученных для данной точки в соответствии с п.3.3. квазиустановившихся перенапряжений.

3.4.2.1. В случае оценочных расчетов $t_{внoi}$ определяют по зависимости "допустимое повышение напряжения – время ":

- для случая "с предварительным нагружением энергетическим импульсом" для ОПН с удельной энергоемкостью не более 5 кДж /кВ $U_н$;
- для случая "без предварительного нагружения" для ОПН с удельной энергоемкостью выше 6кДж/кВ $U_н$.

3.4.2.2. В случаях, когда $U_k \approx U_y$ (резонансные схемы возбуждения высших гармоник, самовозбуждение генераторов, неполнофазные режимы включения (отключения) ВЛ с ШР и т.п.) оценочный расчет $t_{внoi}$ производят по зависимости "без предварительного нагружения". В этих случаях, а также при сравнении ОПН разных типов рекомендуется проводить уточненный расчет согласно Приложению 11.

При этом, если у производителя отсутствует зависимость "без предварительного нагружения энергетическим импульсом", можно поступить следующим образом:

- если есть необходимая зависимость для ОПН другой фирмы (например, "АББ-УЭТМ"), при одинаковой удельной энергоемкости ОПН использовать ее;
- осуществлять переход от зависимости "с предварительным нагружением энергетическим импульсом" (зависимость *A*) к зависимости "без предварительного нагружения энергетическим импульсом" (зависимость *B*) увеличивая значения $t_{внoi}$, полученные с зависимости *A* :
- для ОПН с удельной энергоемкостью до 2,5кДж/кВ$_{номинального напряжения ОПН}$ в 5 раз в диапазоне времен до 100 сек, в диапазоне времен свыше 100 сек – в 3 раза;
- для ОПН с большей удельной энергоемкостью в 6 раз.

3.4.3. Если в течение 1–2 часов подряд возможно несколько коммутаций и появлений квазиустановившихся перенапряжений, происходит ускоренное сокращение ресурса ОПН. Его учитывают путем пересчета временно допустимой длительности текущего воздействия перенапряжения с учетом всех предыдущих срабатываний (от 1 до m), имевших место в течение этих 2–3 часов:

$$t_{допk} = t_{внok} \times \left(1 - \sum_{1}^{m} t_{y\,k-1} / t_{допk-1}\right), \text{ сек} \qquad (5)$$

$t_{допk}$ – допустимое время текущего воздействия перенапряжения на ограничитель, сек ($t_{доп1} = t_{вно1}$);

$t_{внok}$ – нормируемая допустимая длительность текущего воздействия, полученная в соответствии с п.3.3.4., сек;

t_{yk} – реальная длительность данного вида воздействия, сек .

3.4.4. Выбранное значение $U_{но}$ считается удовлетворительным, если выполняются следующие условия:

$$t_{внoi}(t_{допm}) > t_{y\,i} \qquad (6)$$

Для схем, в которых линия может коммутироваться вместе с автотрансформатором или трансформатором принимают следующие условия :

- для обслуживаемых подстанций $t_{внoi}(t_{допm}) > 3600$ сек
- для необслуживаемых подстанций $t_{внoi}(t_{допm}) > 11000$ сек

3.4.5. Для выбранного типа ОПН проверяют выполнение условий пп.3.5.–3.6.

3.5. Определение защитного уровня ограничителя при коммутационных перенапряжениях.

Выбранный выше тип ограничителя проверяется на обеспечение им требуемого защитного уровня коммутационных перенапряжений.

3.5.1. Величина коммутационных перенапряжений определяет значение остающегося напряжения на ограничителе, которое должно быть при расчетном токе не менее, чем на 15–20% ниже испытательного напряжения $U_{ки}$ коммутационным импульсом защищаемого электрооборудования[1]:

$$U_{остк} \le U_{ки} / (1{,}15–1{,}2) \qquad (7)$$

Если в паспортных данных защищаемого оборудования не оговорено специальное исполнение изоляции (например облегченная), то, в связи с введением в действие ГОСТ 1516.3-96, уровень изоляции защищаемого оборудования определяется в соответствующих разделах этого ГОСТ для условий защиты разрядниками. (Так как уровень изоляции оборудования определен, видимо, из условий его защиты ОПН производства КФЗ). При отсутствии ГОСТ 1516.3-96 используют данные ГОСТ 1516.1-76 или паспорта соответствующего оборудования.

Следует отметить, что испытательное напряжение на коммутационной волне нормируется ГОСТ 1516.3-96 для электрооборудования напряжением 330 кВ и выше.

Для электрооборудования 110–220 кВ нормируется одноминутное испытательное напряжение частоты 50 Гц ($U_{исп50}$). Выдерживаемый

[1] Для оборудования со сроком эксплуатации свыше 10 лет рекомендуется увеличить эту разницу до 30–40%.

уровень коммутационных перенапряжений можно определить по формуле: $U_{кн} = 1{,}41 \times 1{,}35 \times 0{,}9 \times U_{исп50}$.

3.5.2. При необходимости выполнения статистической координации изоляции с 2% вероятностью (для случаев: трехфазного АПВ после неуспешного повторного включения, отключение асинхронного хода на конце длинной линии, соединяющей электростанцию большой мощности или отправную систему с мощной приемной энергосистемой) величину остающегося напряжения ограничителя определяют из системы уравнений:

$$U_{остк} = C \times I_р^{\alpha}, \quad (8)$$

$$U_{остк} = U_к - K_{нн} \times Z\lambda \times I_р, \quad (9)$$

где $U_{остк}$ – остающееся напряжение на ограничителе при рассматриваемой коммутации;

$K_{нн}$ – коэффициент несимметрии, учитывающий неодновременность срабатывания ограничителей в различных фазах ($K_н$=1,2–1,3);

$Z\lambda$ - волновое сопротивление линии по прямой последовательности;

$I_р$ - разрядный ток через ограничитель;

$U_к$ - неограниченное КП в сети принимают равным при отсутствии расчетов $3{,}5U_ф$;

α- коэффициент нелинейности, принимают равным 0,05;

С - постоянная, определяют по нормируемым значениям $U_{остк н}$ и $I_{рн}$:

$$C = U_{остк н} / I_{рн}^{\alpha}. \quad (10)$$

Решение уравнения (9) получают графоаналитическим способом: по уравнению (8) строят вольтамперную характеристику ограничителя или ее часть в диапазоне токов несколько ниже и выше $I_{рн}$ и напряжений в области $U_{остк н}$, затем строят прямую $U_к - K_{нн} \times Z\lambda \times I_р$. Пересечение кривых дает решение уравнения (9), т.е. значения $U_{остк}$ и $I_р$ при данном $U_к$. Все расчеты производят в амплитудных значениях напряжения и тока.

При выборе ограничителей для защиты кабельных линий следует учитывать, что волновое сопротивление кабеля в несколько раз меньше, чем у воздушных линий. Неограниченные КП при этом в системе с заземленной нейтралью не превышают $3{,}0U_ф$, поэтому амплитуду возможного тока через ограничитель можно определить по системе уравнений (8) и (9).

3.5.3. Количество ограничителей для защиты от коммутационных перенапряжений определяют по соотношению испытательного напряжения электрооборудования на коммутационном импульсе и остающегося напряжения ограничителя при коммутационных перенапряжениях. Если одного ограничителя недостаточно, то учитывают все ограничители рассматриваемого ОРУ данного класса напряжения, на

которые воздействует данное перенапряжение, с пропорциональным снижением тока через один ограничитель.

3.5.4. Если рассматриваемый ОПН не удовлетворяет условиям пп.3.5.1., то выбирают другой ОПН с тем же значением $U_{но}$, но большего класса энергоемкости (так как с увеличением класса энергоемкости для одинаковых номинальных напряжений уровень остающихся напряжений снижается).

3.6. Определение защитного уровня ОПН при грозовых перенапряжениях.

3.6.1. Расстановка ограничителей в ОРУ определяется надежностью грозозащиты электрооборудования, прежде всего трансформаторов, расчетные импульсные перекрытия изоляции которых не должно превышать один раз в 800–1000 лет.

Выбранный тип ОПН проверяют на возможность установки в ОРУ на расстоянии, обеспечивающем требуемую ПУЭ надежность грозозащиты защищаемого оборудования.

3.6.2. При замене вентильных разрядников (РВ) на ОПН, расстояние от ОПН до защищаемого оборудования можно оценить по формуле:

Переход от расстояний от вентильных разрядников (РВ) до защищаемого оборудования, нормируемых ПУЭ, к расстояниям до ОПН можно оценить по формуле:

$$L_{опн} = L_{рв} \times (U_{исп} - U_{опн}) / (U_{исп} - U_{рв}), \qquad (11)$$

где:

$U_{исп}$ – испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе [кВ],

$U_{опн}$, $U_{рв}$ – остающееся напряжение на ОПН и РВ при токе 10 (5)кА, [кВ],

$L_{опн}$ – расстояние от защищаемого оборудования до ОПН, [м],

$L_{рв}$ – расстояние от защищаемого оборудования до РВ, нормируемое ПУЭ, [м].

Допускается установка ограничителей на место заменяемых разрядников, если значения остающихся напряжений этих ограничителей при токе 10 кА отличаются не более, чем на 1,5% от соответствующих параметров разрядника.

3.6.3. В таблицах Приложения 9 в качестве справочного материала приведены рассчитанные АО "Севзапэнергосетьпроект" расстояния от ограничителей, выпускаемых по ТУ [6, 7] КФЗ, до различных типов оборудования с изоляцией по ГОСТ 1516.1-83, которые обеспечивают

требуемую ПУЭ надежность грозозащиты подстанции [4, 5]. В табл. 1 – 4, 6 приведены расстояния для ОРУ и ЗРУ с изоляцией оборудования обычного исполнения. В таблицах 5, 7 – для обмоток 220 и 500 кВ автотрансформаторов со сниженными уровнями изоляции при различном числе присоединений и ограничителей в РУ. Приведенные значения расстояний подлежат уточнению в установленном порядке при конкретном проектировании.

Данные Приложения 9 можно использовать и для ОПН других производителей при условии, что их уровень остающихся напряжений соответствует $1{,}8U_{н.р.}$.

Для других уровней остающихся напряжений ограничителя или при испытательном напряжении защищаемого оборудования, отличающемся от принятого при расчетах в табл.1–7 Приложения 9, изменение допустимых расстояний до оборудования в ОРУ может быть произведено двумя способами:

- пропорционально изменению разности значений испытательного напряжения защищаемого оборудования и остающегося при токе 10кА напряжения ограничителя (аналогично (11)),
- рассчитано упрощенно как:

$$\Delta L = 0{,}7\,(U_{ост1} - U_{ост2}) \times V/2a, \text{ м} \qquad (12)$$

где ΔL – изменение расстояния по сравнению с табл.1–7 Приложения 9, м;

$U_{ост1}$ – базовая величина, которая принимается равной либо остающемуся напряжению при токе равном 10 (5) кА ограничителя произведенного по Л [6,7] АО КФЗ, либо испытательному напряжению оборудования, для которого рассчитаны расстояния в табл.1–7 Приложения 9, кВ макс;

$U_{ост2}$ – остающееся напряжение при токе 10 (5) кА рассматриваемого к установке ограничителя;

а – средняя крутизна падающих грозовых волн, кВмакс/мкс (длина фронта $t_ф$=3 мкс, амплитуда – среднее разрядное напряжение линейной изоляции $U_л$, $a=U_л/t_ф$ кВ макс/мкс);

V – скорость распространения волны по фазе ошиновки, которая близка к скорости света, м/мкс (можно принимать 300 м/мкс).

Изменение допустимого расстояния ΔL может иметь как положительное (при снижении $U_{ост2}$ или повышении испытательного напряжения), так и отрицательное (при повышении $U_{ост2}$ или снижении испытательного напряжения) значение. По мере усложнения схемы ОРУ и увеличения количества ограничителей изменение ΔL повышается на 10–20% по сравнению с расчетным. Для очень сложных схем и компоновке РУ, сильно отличающихся от указанных в таблицах, рекомендуется

выполнить специальные расчеты грозозащиты (такие расчеты по договору выполняет Севзапэнергосетьпроект).

3.6.4. При установке ОПН на оборудовании с испытательным напряжениям, отличающимся от принятых при расчетах в ПУЭ и табл.1–7 Приложения 9 (например: АТЦДТН 250.000 500/110 кВ с испытательным напряжением 1300кВмакс), расстояние от ОПН до защищаемого оборудования определяют следующим образом:

- по формуле (12) рассчитывают изменение расстояния ΔL_1 при $U_{ост2}$ равном испытательному напряжению защищаемого оборудования по ГОСТ 1516.1-76 или из Приложения 1;
- проводят корректировку базовых величин на ΔL, принимая $U_{ост1}$ равным испытательному напряжению оборудования, на котором устанавливается ОПН;
- с учетом проведенной корректировки по формуле (12) проводят расчет изменения расстояния ΔL_2 при $U_{ост2}$ равном остающемуся напряжению при токе 10 кА рассматриваемого к установке ограничителя и $U_{ост1}$ равном остающемуся напряжению при токе 10кА ОПН производства КФЗ;
- окончательно расстояние от ОПН до защищаемого оборудования определяют как: $\Delta L = L + \Delta L_1 + \Delta L_2$.

3.6.5. При протекании через ограничитель тока грозовых перенапряжений на заземляющем устройстве РУ в месте его присоединения в ЗУ возникают напряжения $U_{зу}$:

$$U_{зу} = I_p \times R_{зу}, \qquad (13)$$

где I_p - ток через ограничитель;

$R_{зу}$ - сопротивление ЗУ в месте присоединения ограничителя.

Так как перенапряжения на вторичных обмотках измерительных трансформаторов может быть примерно в 2 раза выше $U_{зу}$ в месте присоединения их к ЗУ, то точки присоединения ограничителей должны быть как можно дальше удалены от точек заземления этих трансформаторов.

3.7. Выбор ОПН по условиям обеспечения взрывобезопасности.

3.7.1. Для ограничителя нормируется величина тока срабатывания противовзрывного устройства, при которой не происходит взрывного разрушения покрышки ОПН при его внутреннем повреждении. Практически все представленные в настоящий момент в России ОПН имеют противовзрывное устройство.

Значения токов срабатывания этих устройств у разных производителей отличаются в несколько раз. Испытания противовзрывного устройства предусматривают его срабатывание при максимальных значениях токов за несколько сотых долей секунды, при минимальных токах (порядка 0,5кА) за время до 0,5 с При этом, если КЗ не отключено и дуга горит вдоль поверхности ограничителя между соплами, до 1,0 с это не вызывает ее нарушения. При горении дуги от 1,0 до 8,0 с под дугой происходит отрыв ребер от покрышки и их осыпание в полукруге с радиусом, равным высоте ограничителя.

3.7.2. При выборе ограничителей с токами срабатывания противовзрывного устройства до 40 кА, его значение должно быть на 15–20% больше значения тока (однофазного или трехфазного) к.з., определенного для данного РУ.

3.7.3. Для ограничителей с токами срабатывания противовзрывного устройства свыше 40кА и оговоренным в Технических условиях поведением покрышки при горении вдоль ее поверхности дуги (если она замкнута по поверхности) введение коэффициента запаса не требуется.

3.8. Выбор длины пути утечки ОПН.

По зоне загрязнения атмосферы в месте установки ограничителя выбирается нормируемый путь утечки для данных типа и конструкции ограничителя в соответствии с ГОСТ 9920.

Удельная длина пути утечки для ограничителей выбирается не менее, чем на 20% выше, чем для остального оборудования подстанции.

У большинства производителей существует несколько модификаций ОПН, предназначенных для применения в разных зонах загрязнения.

3.9. Особенности выбора ОПН по условиям работы в ОРУ электростанций.

3.9.1. При установке ОПН в РУ электростанций, его выбор определяется с учетом действия автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и форсировки возбуждения генераторов.

Расчетным при этом является случай однофазного КЗ на шинах или вблизи от них на отходящих линиях.

При этом под воздействием АРВ и форсировки возбуждения резко возрастает ток возбуждения ротора и, соответственно, внутренняя ЭДС

генератора и напряжение на выводах трансформаторов и шин ОРУ. При этом, если генератор еще не отключился от сети, то напряжение на неповрежденных фазах ошиновки трансформаторов РУ находится в пределах 1,1–1,2$U_ф$, а после отключения блочного трансформатора или всех линий становится равным ЭДС.

3.9.2. Длительность существования квазиустановившихся перенапряжений в этих режимах определяется временем отключения КЗ линейными или трансформаторными выключателями, их резервированием под действием УРОВ, а также временем гашения поля генераторов.

При установке ОПН взамен разрядников (РВС, РВМГ, РВМК) возможно применение ОПН, например серии Exlim с повышенным уровнем остающихся напряжений и, соответственно большими допустимыми длительностями.

3.9.3. При наличии на станции выделяемых (в ходе коммутаций или действия противоаварийной автоматики) блоков, работающих на малонагруженную линию длиной 150–350 км, возможно возникновение переходного резонанса на второй или третьей гармонике. В этом случае рекомендуется применение ОПН повышенных классов энергоемкости.

Аналогичная ситуация может возникнуть при резервировании линейного выключателя генераторным.

3.9.4. Выбор ОПН для ОРУ станций по току срабатывания противовзрывного устройства рекомендуется проводить с 10–20% запасом. Если ток противовзрывного устройства ниже значения тока КЗ в ОРУ, то следует предусмотреть ограждение ОПН.

3.10. Выбор ОПН по механическим характеристикам.

3.10.1. ОПН серийно выпускается для климатического исполнения УХЛ и категории размещения 1 в соответствии с ГОСТ 15150-89 .

Ограничители 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 гололеде 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.

3.10.2. При необходимости установки ОПН в условиях, отличающихся от указанных, необходимо связаться с производителем для выяснения возможности изготовления ОПН (его покрышек и систем крепления к фундаменту) с другими механическими характеристиками.

3.10.3. При установке ОПН в зонах с повышенной сейсмической опасностью (выше 7 баллов по MSC-64) необходимо обратиться к производителю ОПН для выбора наиболее подходящей конструкции ОПН или его установки.

3.10.4. Некоторые фирмы выпускают на каждый класс напряжения по две модификации ОПН по изгибающим моментам.

4. Применение и место установки ОПН.

Защита электрооборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений должна соответствовать рекомендациям ПУЭ.

4.1. Места установки ОПН определяются функциональным назначением соответствующего ограничителя:

- в цепи трансформатора, автотрансформатора или шунтирующего реактора – для защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений при их включении или отключении;
- на конце линии – для защиты от КП при ее включении или отключении и ограничения набегающих на РУ волн грозовых перенапряжений.

Дополнительный ограничитель устанавливают на линии для ее защиты от КП, если шунтирующий реактор или трансформаторы (автотрансформаторы) присоединены к линии через выключатели.

При установке ОПН на шунтирующем реакторе или автотрансформаторе (трансформаторе), подключаемым к линии без выключателей, через искровое присоединение или выключатель-отключатель, дополнительный ограничитель, присоединяемый непосредственно к линии, не устанавливают.

4.2. Ограничители должны быть установлены без коммутационных аппаратов в цепи присоединения к линии, шинам РУ или ошиновке автотрансформаторов (трансформаторов) или шунтирующих реакторов. Спуск от ошиновки к ограничителю выполняется теми же проводами, что и для остальной аппаратуры РУ. Заземление ограничителя осуществляется присоединением к заземляющему устройству РУ.

4.3. Большинство ограничителей не требуют эксплуатационного контроля состояния, что должно быть оговорено инструкцией по эксплуатации ОПН. В противном случае, изготовитель должен указать в инструкции необходимые виды испытаний, методы их проведения и периодичность. В связи с этим установка счетчиков срабатываний ОПН не является необходимой.

4.4. При необходимости измерения токов ОПН под рабочим напряжением подключение измерительных приборов производится в соответствии с указаниями, приведенными в Инструкции по эксплуатации аппарата.

4.5. Точка присоединения ограничителя к заземляющему устройству (ЗУ) должна быть максимально удалена от точек присоединения к этому ЗУ измерительных трансформаторов.

4.6. Если ограничители имеют противовзрывные клапаны с отводящими соплами, то они должны быть установлены так, чтобы сопла

были расположены по продольной оси ячейки. Тогда безопасное расстояние от путей обхода до ограничителя будет примерно соответствовать расстоянию от него до границ ячейки при применении электрооборудования с нормальной изоляцией по ГОСТ 1516.1-83.

При отсутствии противовзрывных устройств расстояние до путей обхода удваивается и устанавливаются таблички с предупреждающими надписями.

4.7. При установке ОПН взамен разрядника с использованием его стойки, ОПН, с помощью переходной конструкции, крепят так, чтобы верхний зажим находился на той же высоте, что и у разрядника. При монтаже ОПН с увеличением длины спусков от ошиновки необходимо провести дополнительные расчеты по определению изгибающих моментов, действующих на верхний фланец.

5. Особенности выбора ОПН по условиям работы в КРУЭ.

5.1. Для защиты комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией (КРУЭ) используют ОПН внешней и внутренней установки.

ОПН, устанавливаемый внутри КРУЭ, поставляются заводом-изготовителем КРУЭ в комплекте.

ОПН, устанавливаемый снаружи КРУЭ, размещают в местах ввода воздушных линий в КРУЭ на расстоянии до 10 м от него, с присоединением заземления ОПН к заземляющему устройству последнего.

Выбор электрических характеристик этих ОПН производят в соответствии с гл.2 настоящих Указаний.

5.2. Если присоединение ВЛ к КРУЭ производится кабелем или элегазовым токопроводом, то ОПН устанавливается в месте перехода ВЛ и его заземление присоединяется к оболочке кабеля или токопровода.

При длине кабеля или токопровода более 100 м и его присоединении к шинам КРУЭ через разъединитель, перед разъединителем устанавливают дополнительный ОПН с таким же остающимся напряжением, как у первого.

5.3. На присоединениях трансформаторов к шинам КРУЭ через выключатели между разъединителями трансформаторного выключателя и трансформатором устанавливается внутренний ОПН.

Если расстояние от внутреннего ОПН до присоединенного элегазовым токопроводом или вводом "элегаз-масло" трансформатора больше половины максимального расстояния, допускаемого по Приложению 8 в соответствии с электрической схемой КРУЭ и длиной защищаемого подхода ВЛ, то на половине нормируемого Приложением 8 расстояния от трансформатора устанавливают дополнительный ОПН с такими же остающимися напряжениями. Заземление этого ОПН присоединяется к заземляющему устройству трансформатора.

5.4. ОПН, предназначенные для внутренней установки, по энергоемкости выбирают на класс выше, чем ОПН для внешней установки.

6. Схемно - режимные мероприятия по повышению надежности работы ограничителя.

6.1. Если в нормальных режимах работы сети ее наибольшее рабочее напряжение может превышать длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя, обеспечить условия его работы можно следующими мероприятиями, вводимыми на летний сезон:

а) переключением РПН автотрансформатора с целью постоянного снижения напряжения на той его обмотке, где относительное повышение напряжения по отношению к номинальному выше, что эффективно при соизмеримых индуктивных сопротивлениях примыкающих систем;

б) при незагруженных автотрансформаторах подстанций сети на каждой подстанции на части из них установить повышенный, а на другой части – пониженный коэффициент трансформации, чтобы повысить степень компенсации зарядной мощности сети за счет увеличения потерь реактивной мощности вследствие протекания уравнительного тока;

в) шунтирующие реакторы и автотрансформаторы 500 и 750 кВ в ремонт выводить пофазно, оставляя две оставшиеся фазы для работы в неполнофазном режиме.

6.2. В нейтрали шунтирующих реакторов 500 и 750 кВ, установленных на линии, при длинах линии, указанных в табл.2 Приложения 8, при установке ОПН-500 и ОПН-750 с удельной энергоемкостью ниже 7 кДж/кВ номинального напряжения ОПН, необходимо устанавливать компенсационный реактор типа РЗКОМ-20000/35, шунтированный выключателем и ограничителем 35 кВ, с соответствующей релейной защитой и автоматикой.

6.3. Предложенные ниже мероприятия могут быть реализованы только после проектной проработки:

6.3.1. Для подстанций 110-220 кВ с разземленными нейтралями трансформаторов применять заземление нейтрали выключателем, управляемым от автоматики повышения напряжения, включенной на обмотку электромагнитного трансформатора напряжения, соединенного по схеме разомкнутого треугольника, вручную или дистанционно.

6.3.2. Для автотрансформаторов 500 и 750 кВ, работающих с линиями по полублочной схеме, в которых квазиустановившиеся перенапряжения превышают допустимую величину, применять

размыкание соединений по схеме треугольника обмотки низшего напряжения.

6.3.3. Для трансформаторов 110–330 кВ, работающих без выключателей на стороне высшего напряжения, в которых квазиустановившиеся напряжения превышают допустимую для ограничителей величину, применять закорачивание выключателей или короткозамыкатели на обмотках низшего напряжения, включаемых от пофазной автоматики от повышения напряжения.

7. Примеры выбора ОПН.

В данной главе приведены несколько примеров выбора ОПН для различных условий установки[1].

7.1. Рассмотрим пример выбора ограничителя для замены разрядника типа РВМК-500 на присоединенном к линии 500 кВ шунтирующем реакторе. Линия 500кВ выполнена проводами 3АС-330, длина 360 км. Наибольшее значение тока короткого замыкания на шинах подстанции – 25 кА. Степень загрязнения по ГОСТ 9920–2. По концам линии подключено по шунтирующему реактору (ШР).

В летнее время в нормальных режимах напряжение на шинах подстанции не опускается ниже 530 кВ, находясь в диапазоне 530–545 кВ. Время действия последней ступени резервной защиты на головном выключателе – 3,5 с. Время действия УРОВ + время срабатывания выключателя = 1,5 сек.

Длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя выбирается по наибольшему уровню напряжения сети с 2% запасом и должно быть не менее: $545/\sqrt{3}\times 1{,}02 = 321$кВ. Ближайшие к этому значения по каталожным данным (см. Приложение 6) будет 333 кВ у ОПН производства ЗАО "Феникс-88". Значение выдерживаемого без взрывного разрушения тока короткого замыкания этого ОПН – 40 кА.

В соответствии с п.3.3.2.2. для ограничителей, устанавливаемых на шунтирующем реакторе, подключенном к линии, наибольшие квазиустановившиеся перенапряжения бывают в несимметричных режимах:

- одностороннего отключения несимметричного КЗ вследствие каскадного действия релейных защит. По табл. 1 Приложения 8 определяем для случая с одним выведенным в ремонт реактором наибольшее (в зависимости от конца линии и сопротивления примыкающих систем) значение U_y = 1,31 (с учетом того, что длина больше 350 км, а для большей длины перенапряжения больше), наибольшая длительность этого режима 3,5 сек;

- неполнофазного включения и отключения линии, в том числе и с учетом действия УРОВ, вследствие отказа фаз коммутируемого выключателя. Определяем по табл. 2. Приложения 8 для случая с 2 ШР U_{y2} = 1,44, длительность существования режима – 1,5 сек.

Что касается режима асинхронного хода, тоже учитываемого при такой установке ОПН, то согласно п.3.3.4.2 значение установившихся

---

[1] Расчет ведется в относительных единицах по отношению к фазному наибольшему рабочему напряжению сети ($U_{н.р.}$) или в фазных значениях.

перенапряжений в нем не превышают 1,3, а длительность – 0,5–1сек. Эти значения являются промежуточными по сравнению с первыми двумя случаями и на выбор ОПН в данном случае влияния не оказывают.

По рис.6 для длительности 1,5 сек определяем T_{r1} = 1,42. *Определяем* достаточность выбранного длительно допустимого рабочего напряжения:

$U_{нрог1} = U_{y2} / T_{r1} = (1{,}44 \times 303) / 1{,}42 = 307{,}3$ кВ.

По рис.6 для длительности 3,5сек определяем T_{r2}=1,37. Определяем достаточность выбранного длительно допустимого рабочего напряжения:

$U_{нрог2} = U_{y1} / T_{r2} = (1{,}31 \times 303) / 1{,}37 = 290$ кВ.

Как видно, первоначально выбранный $U_{нро}$ значительно больше $U_{нрог1}$ и $U_{нрог2}$, т.е. изменений не требует.

В соответствии с п.3.4.2.1 и п.3.4.2.2. для выбранного типа ОПН определяют достаточность вольт временной характеристики. Так как очевидно, что для U_{y1} выбранные характеристики достаточны, то проверку проводят по U_{y2} = 1,44: T_r = 1,44×303/333 = 1,31. Для этого T_r по рис.6 определяют $t_{вно}$=10,6сек, значение которого с переходом на зависимость "без предварительного нагружения" увеличивается в 4–5 раз.

$t_{вно} > t_{y1}$, т.е. выбранный ОПН удовлетворяет всем условиям.

Так как остающиеся напряжения данного ОПН при коммутационном и грозовом импульсе ниже остающихся напряжений разрядника, то его установку можно осуществлять на место разрядника.

7.2. Необходимо выбрать ограничитель для замены разрядника типа РВМГ – 220 (II группа по ГОСТ 16357) на присоединенном без выключателей к линии 220 кВ трансформаторе мощностью 40МВ·А с нормальной изоляцией. (Аналогичная схема может возникнуть на трансформаторе с выключателем при действии УРОВ или выводе в ремонт линейного выключателя). Линия 220кВ выполнена проводами АС-300, длина 100 км. Подстанция обслуживаемая. Максимальное значение тока короткого замыкания на шинах 220кВ – 16кА.

В нормальном режиме напряжение на трансформаторе может достигать 1,02 от наибольшего рабочего напряжения в течение 8 ч в сутки. Время действия последней ступени резервной защиты на головном выключателе – 4,0 с. Зона загрязнения – 2.

Длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя выбирается по наибольшему уровню напряжения сети с 2% запасом и должно быть не менее:

$1{,}02 \times 1{,}02\ U_{н.р.} = 1{,}04 U_{ф\ н.р.}$ или 152 кВ (на фазу)

Ближайшие к этому значения по каталожным данным (см. Приложение 4) будут 154 кВ (СП" АББ-УЭТМ", "Таврида-Электрик") и 157 кВ ("Феникс-88").

Значение квазиустановившегося перенапряжения в неполнофазном режиме можно оценить по рис.9: при длине ВЛ 100 км и трансформаторе 40 МВ. А его можно принять равным 1,45.

Так как схема входит в зону возможного переходного резонанса на 2-ой гармонике, то согласно п.3.3.5 необходимо учесть проявление этой гармоники в течение 0,5 сек с амплитудой квазиустановившегося перенапряжения равной: $1,45 + 0,3 = 1,75U_{ф.н.р.}$ или 255 кВ.

В качестве примера рассматривается возможность применения ОПН серии EXLIM (аналогичные рассуждения и при выборе ОПН производства "Феникс-88" или "Таврида-электрик").

СП "АББ–УЭТМ" выпускает ОПН четырех классов энергоемкости. Наиболее экономичный по стоимости класс энергоемкости R. Однако в соответствии с п.3.2.2.1., в схемах где возможна коммутация блока линия–трансформатор рекомендуется устанавливать класс энергоемкости не ниже 4,0–4,5 кДж/кВ номинального напряжения, что соответствует у ОПН серии Exlim классу Q.

Далее для возможности сравнения, выбор осуществлялся сразу для всех классов энергоемкости.

Наибольшему значению квазиустановившихся перенапряжений в точке установки ОПН – 1,75 соответствует длительность 0,5с. По значению этой длительности по прямой *А* рис.1–4 определяют T_r:

- для класса R T_r=1,165 ;
- для класса Q,P кривые А совпадают и T_r=1,18;
- для класса T T_r=1,16.

Для ОПН производства "Таврида-Электрик" (рис.6) T_r =1,46 – при этом надо иметь в виду, что зависимость дана в о.е. по отношению к $U_{нро}$.

Для ОПН производства ЗАО "Феникс-88" (рис.7) T_r=1,46 (зависимость приведена в о.е. по отношению к $U_{нро}$).

Соответственно расчетные значения номинальных напряжений равны:

- для класса R Ur = 255/1.165= 218,9 кВ;
- для классов Q,P Ur = 255/1,18 = 216,1 кВ;
- для класса T Ur = 255/1,16 = 219,8 кВ.

Ближайшие каталожные значения номинального напряжения ОПН в этом случае: 216 и 228 кВ (см. Приложение 4 и ТУ на ОПН серии EXLIM). Повышению напряжения 255 кВ у них соответствует для номинального напряжения 216 кВ – T_r = 1,18, для номинального напряжения 228 кВ – T_r= 1,12 .

Для ОПН производства "Таврида-Электрик" определяют не расчетное значение номинального напряжения, а расчетное значение $U_{нрог}$=255/1,46=174,6 кВ. Фирма не выпускает ОПН с таким или большим значением $U_{нро}$ (см. Приложение 4).

Для ОПН производства ЗАО "Феникс-88" $U_{нрог}$=255/1,46=174,6кВ. Ближайшее большее значение $U_{нро}$=176 кВ, а $U_{но}$=220 кВ. Повышению напряжения 255 кВ для ОПН с такими характеристиками соответствует $T_г$=1,45.

В связи с тем, что в данной схеме возможно следование друг за другом нескольких квазиустановившихся режимов, далее выполнен расчет в соответствии с Приложением 10.

Расчет произведен для ОПН Т-228, для остальных ОПН расчеты выполнялись по тому же алгоритму, результаты сведены в табл.2.

Для ОПН Т-228 $T_г$=1,12. По кривой А (рис.4) этому соответствует допустимое время 2,1с, по кривой *В* – 13с. Энергоемкость ОПН-220В УХЛ1 производства КФЗ составляет 370 кДж, энергоемкость Т-228 – 2280 кДж. Коэффициент неиспользованной энергоемкости при коммутационных перенапряжениях $K_{кп}$ = 370/2280= 0,162.

Допустимое время воздействия КУП 255кВ составит по формуле из Приложения 10: $t_{вно1}$= 13 – (13 – 2,1)×0,162=11,234сек.

После первых 0,5 с величина КУП снизится до 1,45 (211 кВ), чему соответствует $T_г = U_у/U_г$= 211/228 = 0,925. Для этого $T_г$ допустимое время воздействия по кривой *А* – 3500 с, по кривой *В* – 23000 с.

Тогда $t_{вно2}$ =23000–(23000–3500)×0,162=19840с. С учетом сработанной части ресурса в течении 0,5с при КУП 1,78, допустимая длительность воздействия КУП= 1,45 составит:

$t_{доп}$= $t_{вно2}$× (1– $t_{у1}$/ $t_{доп1}$) = 19840×(1–0,5/11,234) = 18956 с.

Аналогичные расчеты можно выполнить и для ОПН производства "Феникс-88". При этом значения зависимости "без предварительного нагружения" для него можно брать с соответствующей зависимости (*В*) для ОПН серии Exlim соответствующего класса энергоемкости (R).

Из таблицы 2 видно, что однократное воздействие квазиустановившегося перенапряжения заданного вида позволяет использовать любые ограничители (даже класса R) с номинальным напряжением 216 или 228 кВ (а также ОПН-176 производства ЗАО "Феникс-88"). Так как подстанция обслуживаемая, то достаточно выбрать ОПН с $T_{доп}$ большим 3600 сек (что позволит учесть возможность последующей коммутации в течение ближайшего часа). Этому требованию удовлетворяют ОПН серии Exlim классов энергоемкости R, Q, Ри Т с номинальным напряжением 228 кВ, классы энергоемкости Q и Р с номинальным напряжением 216 кВ, а так же ОПН с наибольшим рабочим напряжением 176 кВ фирмы "Феникс-88".

Остающееся напряжение при токе грозового импульса амплитудой 5 кА для РВМГ-220 II группы по ГОСТ 16357 составляет 515 кВ. Согласно п.3.6. для установки ОПН на место разрядника, остающееся напряжение при этом токе на ОПН должно быть меньше или равно 515 кВ. Этому

требованию из отобранных ОПН серии Exlim более всего удовлетворяет ОПН класса Q и P с номинальным напряжением 216 кВ. Отобранный ОПН фирмы "Феникс-88" также удовлетворяет этим условиям. Все выбранные ОПН удовлетворяют требованиям п.3.7.2.

При окончательном выборе типа ОПН необходимо помнить, что с одной стороны он устанавливается на изношенное оборудование, для которого целесообразно применять защитные аппараты с большей степенью ограничения, чем прежде. С другой стороны – с повышением класса энергоемкости (при переходе к следующему классу) стоимость ОПН увеличивается, как минимум на 25%.

Таблица 2.

Сводные результаты расчетов по выбору ОПН в сети 220 кВ

Тип ОПН	R		Q		P		T	
U_r	216	228	216	228	216	228	216	228
W, кДж	540	570	972	1026	1512	1596	2160	2280
Kw/ wex	0.685	0.649	0.3806	0.3606	0.2447	0.2318	0.1713	0.162
Tr_1	1.18	1.12	1.18	1.12	1.18	1.12	1.18	1.12
t_1 по:								
A, с	0.15	4.0	0.48	4.5	0.48	4.5	0.22	2.1
B, с	1.6	19.0	1.85	22.0	1.85	12.0	1.3	13.0
$T_{доп1}$. с	0.606	9.265	1.338	15.689	1.514	17.944	1.115	11.234
Tr_2	0.976	0.925	0.976	0.925	0.976	0.925	0.976	0.925
t_2 по:								
A, с	2500	28000	1400	8000	1400	8000	500	3500
B, с	7500	55000	8500	60000	8500	60000	4000	23000
$T_{доп2}$. с	4075	37477	5797.7	41248.8	6762.6	47946	3400	19840
$T_{доп.}$ с	712.78	35454.5	3631.0	39934	4529.2	46610	1875.3	18956
ОПН: $U_{ост\ ки}$	437	460	419	440	420	425	414	420
$U_{ост\ ги}$ при 5 кА	532	561	491	518	470	496	456	481
Разрядник $U_{ост\ ги}$, при 5 кА	515							

В данном случае, исходя из вышесказанного, было принято решение о выборе ОПН типа Q-216 СМ 245.

7.3. Рассмотрим пример выбора ОПН при замене разрядника типа РВМК-750, установленного на АТ-417000/750/500, подключенного по схеме "треугольник" вместе со вторым АТ к линии 750кВ. Длина линии

396км, выполнена проводами в фазе 5хАС-330/43. На линии установлено 3 шунтирующих реактора. Наибольшее значение тока короткого замыкания на шинах подстанции – 25кА. В нормальных режимах уровень напряжения на шинах 750кВ не превышает 790кВ, т.е. практически равен наибольшему рабочему. Зона загрязнения -II по ГОСТ 9920. Время действия последней ступени резервной защиты на головном выключателе – 4,5 с.

Длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя выбирается по наибольшему уровню напряжения сети с 2% запасом и должно быть не менее: $787/\sqrt{3}\times1{,}02 = 463$ кВ. Ближайшее большее этого значения по каталожным данным (см. Приложение 7) у ОПН производства ООО "АФ-Полимер" будет 478 кВ. Значение выдерживаемого без взрывного разрушения тока короткого замыкания этого ОПН – 30 кА.

В соответствии с п.3.3.2.1. для ограничителей, устанавливаемых на автотрансформаторе, который по схеме ОРУ не коммутируется вместе с линией, наибольшие квазиустановившиеся перенапряжения бывают на неповрежденных фазах при несимметричном кз на шинах ПС. Их максимальные значения не превышают 1,4 наибольшего рабочего напряжения сети. В данном случае эта величина составляет 1,05.

Кроме того, в соответствии с п.3.3.5. необходимо предусмотреть возможность возникновения переходного резонанса на 2-й или 3-й гармонике при коммутации противоположного конца линии. Согласно расчетам, выполненным в соответствии с Приложением 9 величина квазиустановившихся перенапряжений с учетом гармоники составит $1{,}35U_y$, длительность – 0,5сек. После перенапряжение снижается до значения 1,18, которое существует до окончания времени срабатывания последней ступени релейной защиты. Согласно рис.П5.6 ТУ на ОПН этого производителя для длительности 0,5сек по зависимости с "предварительным нагружением энергетическим импульсом" определяем $T_{r1}= 1{,}45$. Определяем достаточность выбранного длительно допустимого рабочего напряжения:

$U_{нрог1} = U_{y1}/ T_{r1} = (1{,}35\times455) / 1{,}45 = 423{,}2$ кВ.

Как видно, первоначально выбранный $U_{нро}$ больше $U_{нрог1}$ и изменений не требует.

В соответствии с п.3.4.2.1 и п.3.4.2.2. для выбранного типа ОПН определяют достаточность вольт временной характеристики по $U_y = 1{,}35$:

$T_r = 1{,}35\times455/478= 1{,}285$. Для этого T_r по рис.П5.6 по зависимости "без предварительного нагружения" определяют $t_{вно} = 1000$сек, $t_{вно}>t_{y1}$, т.е. выбранный ОПН имеет запас по времени на следующую коммутацию. Т.к. квазиустановившееся напряжение в данном случае, хотя и воздействует непрерывно, но имеет два значения, то в соответствии с п.3. 4.3 производим расчет срабатывания ресурса по формуле (5):

$T_{допк} = 1000\times(1- 0{,}5/1000) = 999{,}5$сек.

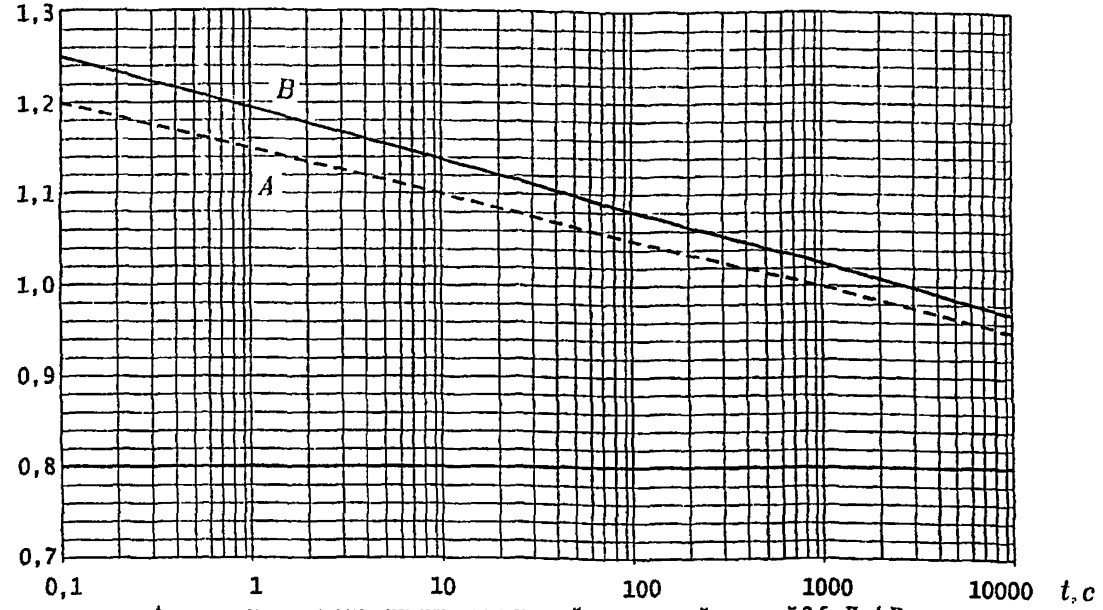
После первого воздействия значение квазиустановившегося перенапряжения снижается до 1,18 , чему соответствует T_{r2}=1,18×455/478=1,12. Этому значению соответствует на зависимости "без предварительного нагружения энергетическим импульсом" длительность свыше 10000сек. С учетом предыдущего воздействия допустимая длительность текущего воздействия составит: $T_{доп_k}$ = 10000×(1–((4,5–0,5)/ 999,5))= 9956 сек.

Так как остающееся напряжение данного ОПН при грозовом импульсе тока с амплитудой 10кА (1466кВ) ниже остающегося напряжения разрядника при таком же импульсе тока (1650кВ), то его установку можно осуществлять на место разрядника.

Литература.

1. Руководящие указания по выбору средств компенсации реактивной мощности. НТА Энергопрогресс, 1996.
2. Рекомендации по применению ограничителей перенапряжений в электрических сетях 110–750 кВ РАО "ЕЭС России", Интер ЭСП, 1997.
3. Проект "Руководящих указаний по защите от внутренних перенапряжений электротехнических установок переменного тока 3–50 кВ". ВЭИ и Энергосетьпроект, Электрические станции, 1964 г., NN11-12.
4. Разработка норм для ПУЭ на максимально допустимые расстояния до защищаемого оборудования. Отчет СЗО Энергосетьпроекта, 12581, 1984.
5. Методика расчета наибольших допустимых расстояний от ограничителей перенапряжений типа ОПН до автотрансформаторов 750/500 кВ и 500/220 кВ со сниженными уровнями изоляции. Отчет СЗО Энергосетьпроекта, 13122тм-т1, 1989.
6. ТУ на выпускаемые Корниловским фарфоровым заводом ОПН 110–220кВ: ТУ 3414-013-04682628-96, ТУ 3414-019-046828-97, на ОПН 110 II,IV; 220 II,IV УХЛ1: ТУ 3414-011-04682628-96.
7. ТУ на выпускаемые Корниловским фарфоровым заводом ОПН 500кВ: ТУ 344-014-046282628-96.
8. ТУ на выпускаемые Корниловским фарфоровым заводом ОПН 750кВ: ТУ 16-521.277-82.
9. ТУ на выпускаемые ЗАО "АББ-УЭТМ" ОПН серии Exlim 110–750кВ: ТУ 16-97 N 1БП.768 004 ТУ.
10. Методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110–500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения. МУ-34-70-163-87. Москва, 1987г.

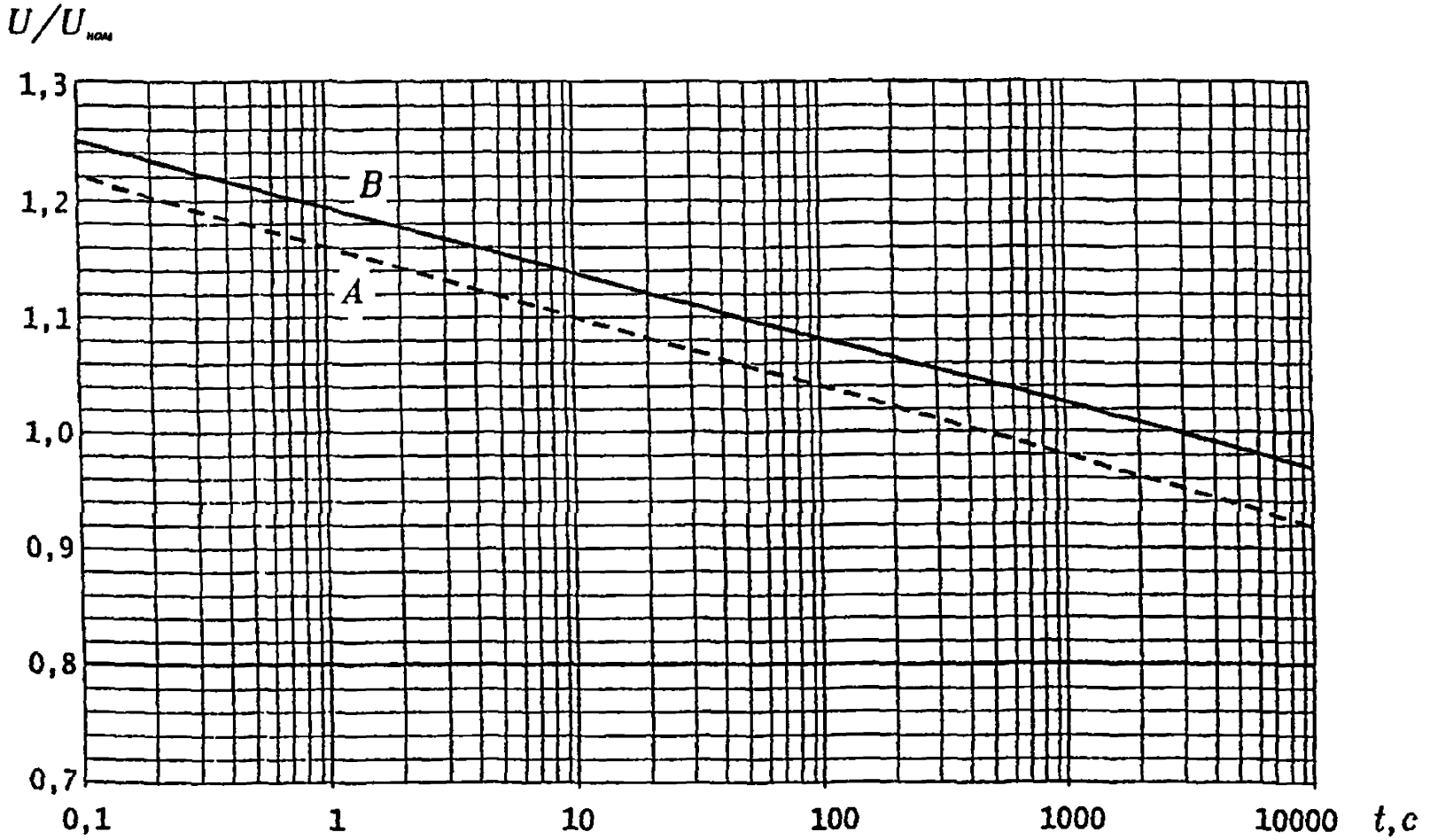
Рисунки.



А - при предварительном нагружении удельной поглощаемой энергией 2,5 кДж/кВ$_{U_{ном}}$ при температуре окружающего воздуха +45 °С,

В - в исходном состоянии при температуре окружающего воздуха +45 °С

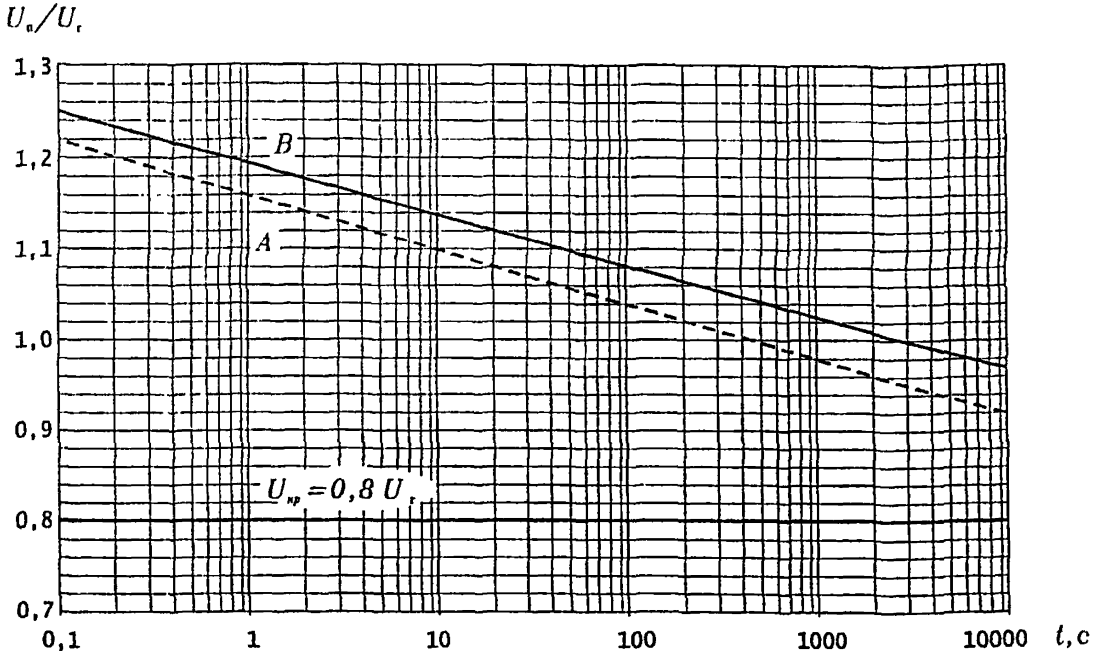
Рис.1. *Зависимость относительных величин временных перенапряжений $U_н$ промышленной частоты, которые должны выдерживать ОПН EXLIM R, от их длительности.*



А - при предварительном нагружении удельной поглощаемой энергией 4,5 кДж/кВ$_{U_{ном}}$ при температуре окружающего воздуха +45 °С,

В - в исходном состоянии при температуре окружающего воздуха +45 °С

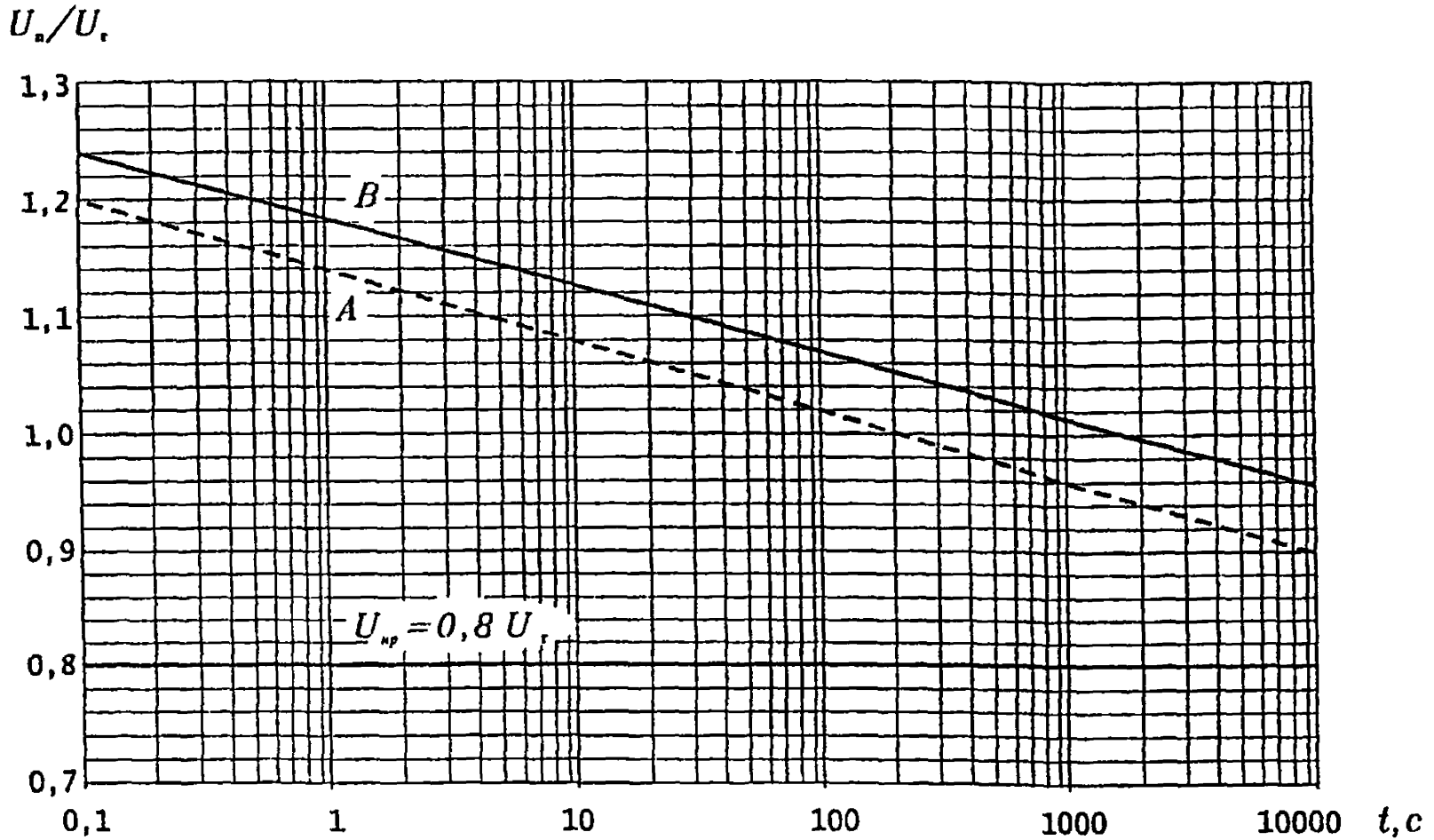
Рис.2. *Зависимость относительных величин временных перенапряжений U_n промышленной частоты, которые должны выдерживать ОПН EXLIM Q, от их длительности.*



А - при предварительном нагружении удельной поглощаемой энергией 7 кДж/кВ$_{U_{раб\ ОПН}}$ при температуре окружающего воздуха +45 °С,

В - в исходном состоянии при температуре окружающего воздуха +45 °С

Рис.3. *Зависимость относительных величин временных перенапряжений $U_п$ промышленной частоты, которые должны выдерживать ОПН EXLIM P, от их длительности.*



А - при предварительном нагружении удельной поглощаемой энергией 10 кДж/кВ$_{U_{ном\ ОПН}}$ при температуре окружающего воздуха +45 °С,

В - в исходном состоянии при температуре окружающего воздуха +45 °С

Рис.4. *Зависимость относительных величин временных перенапряжений $U_п$ промышленной частоты, которые должны выдерживать ограничители EXLIM T, от их длительности.*

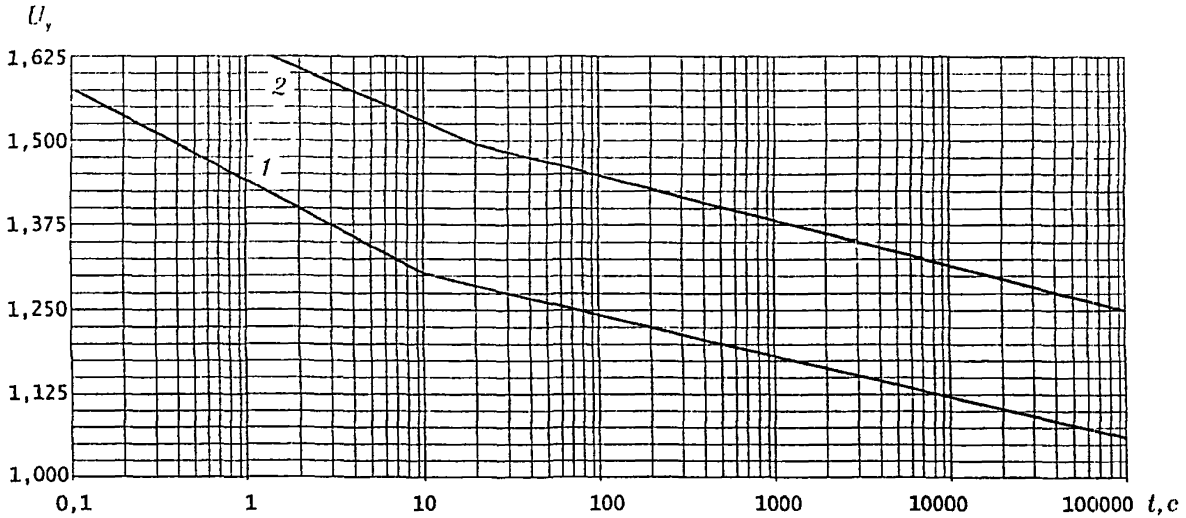


Рис.5. *Зависимость "допустимое напряжение-время" для случая без предварительного нагружения импульсом энергии для ОПН, выпускаемых АООТ "КФЗ" по ТУ №:*
1) 3414-019-04682628-97,
2) 3114-011-04682628-96.

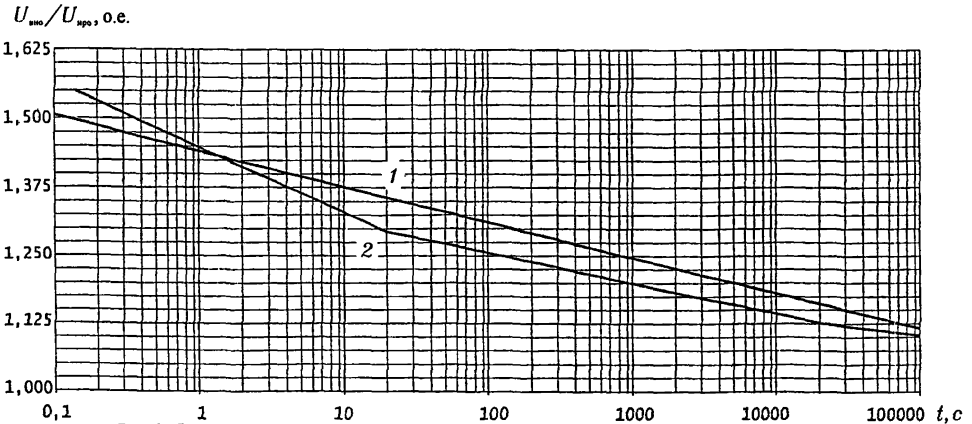


Рис.6. *Зависимость "допустимое напряжение-время" для случая:*

1) предварительного нагрева и нагружения импульсом 2,5 кДж/кВ $U_н$ для ОПН 110-220 кВ, выпускаемых ЗАО "Феникс-88" по ТУ 3414-007-06968694-97,

2) предварительного нагрева и нагружения импульсом 7,0 кДж/кВ $U_н$ для ОПН 500 кВ, выпускаемых ЗАО "Феникс-88" по ТУ 3414-013-06968694-99.

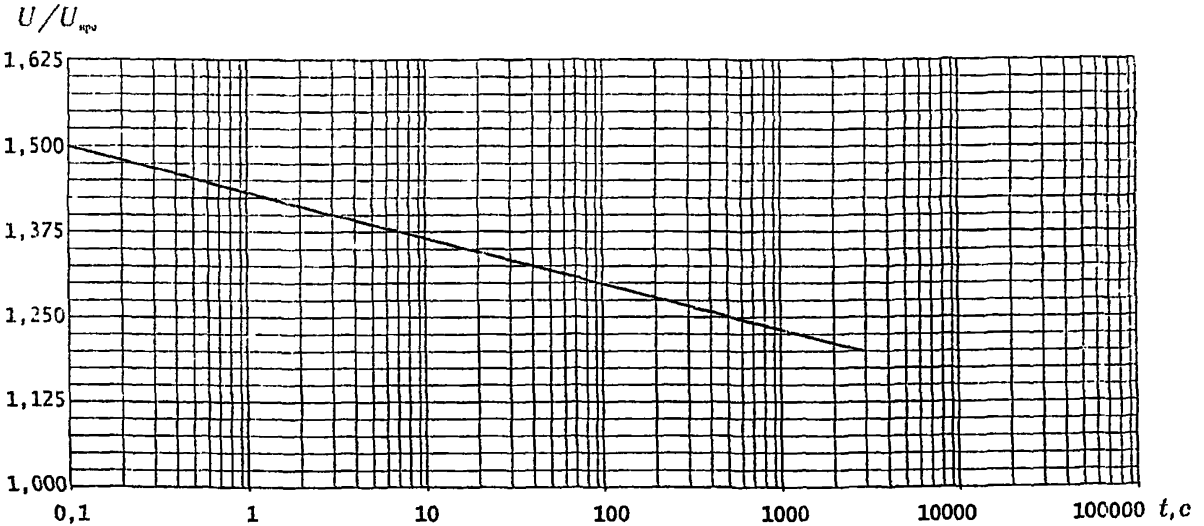


Рис.7. *Зависимость "допустимое напряжение-время" для случая предварительного нагружения импульсом 2,25 кДж/кВ $U_{нро}$ для ОПН, выпускаемых ООО "Таврида-Электрик" по ТУ № ИТЕА 674361.0005.*

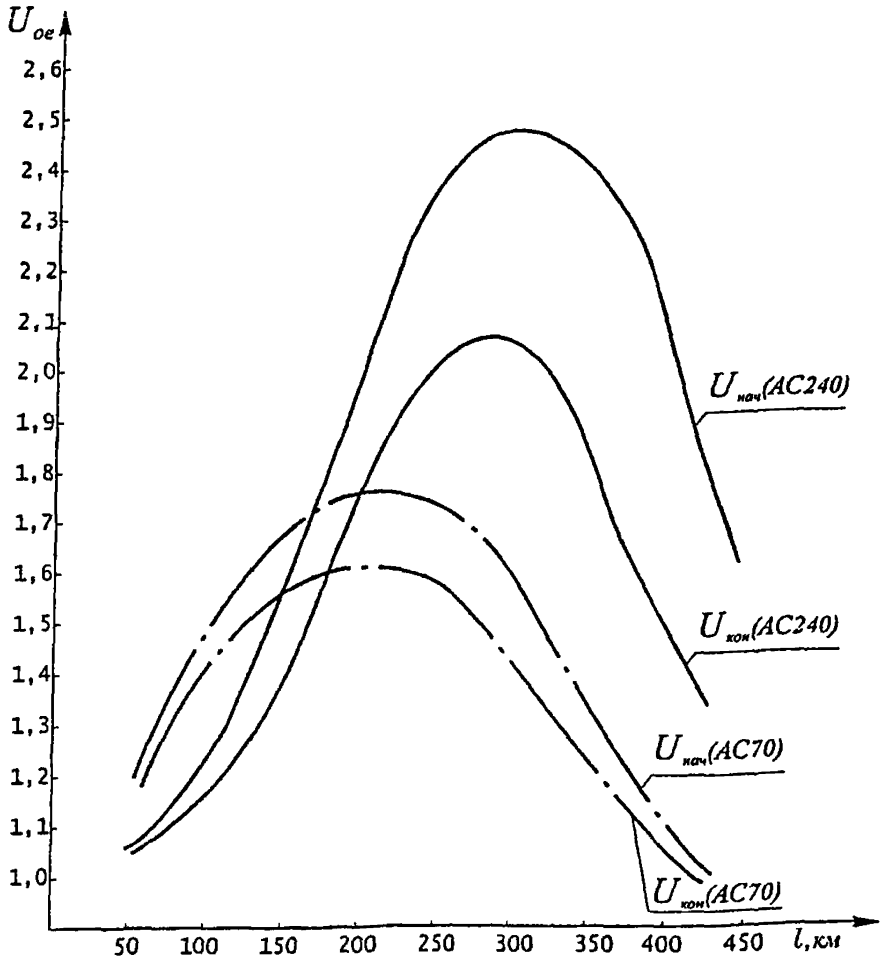


Рис.8. *Максимальные величины установившихся перенапряжений в полублочной схеме электропередачи 110 кВ при включении 2-х фаз ВЛ.*

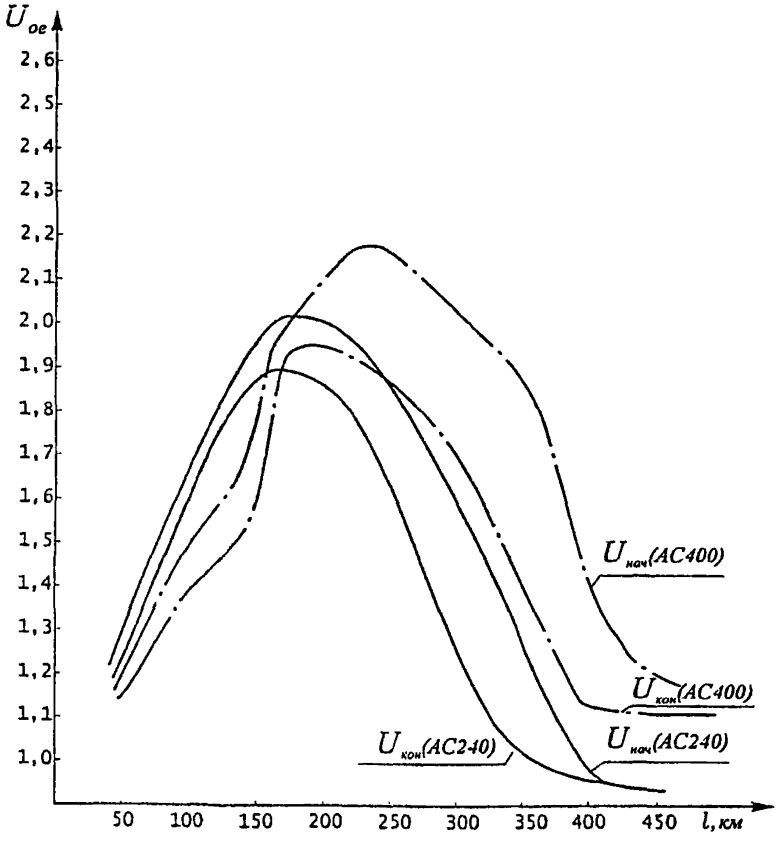


Рис.9. *Максимальные величины установившихся перенапряжений в полублочной схеме электропередачи 220 кВ при включении 2-х фаз ВЛ.*

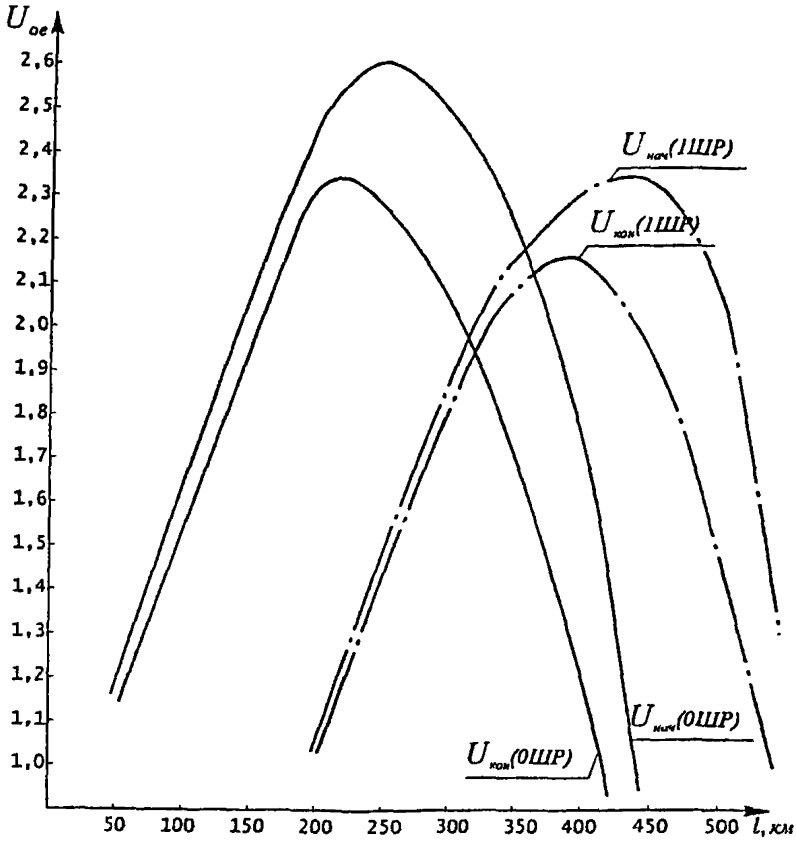


Рис.10. *Максимальные величины установившихся перенапряжений в полублочной схеме электропередачи 500 кВ при включении 2-х фаз ВЛ.*

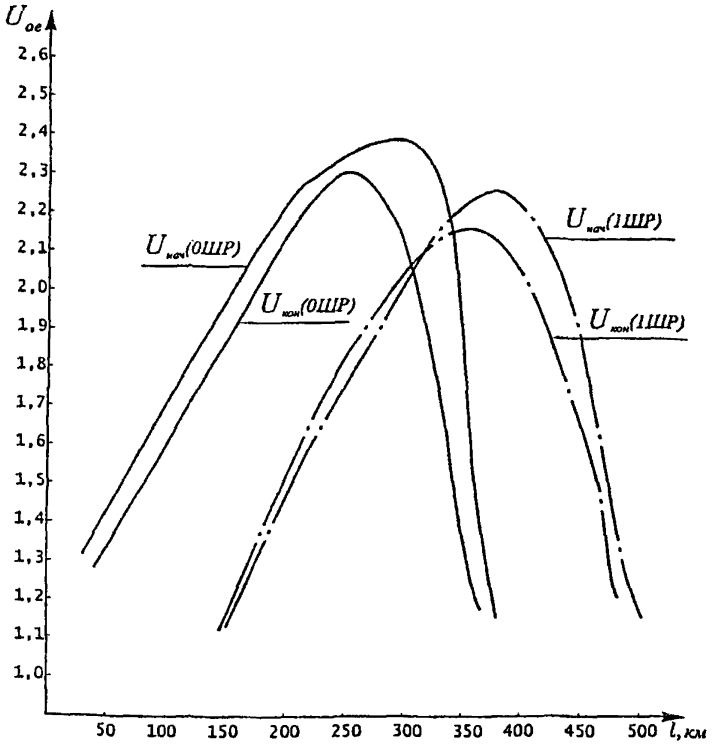


Рис.11. *Максимальные величины установившихся перенапряжений в полублочной схеме электропередачи 750 кВ при включении 2-х фаз ВЛ.*

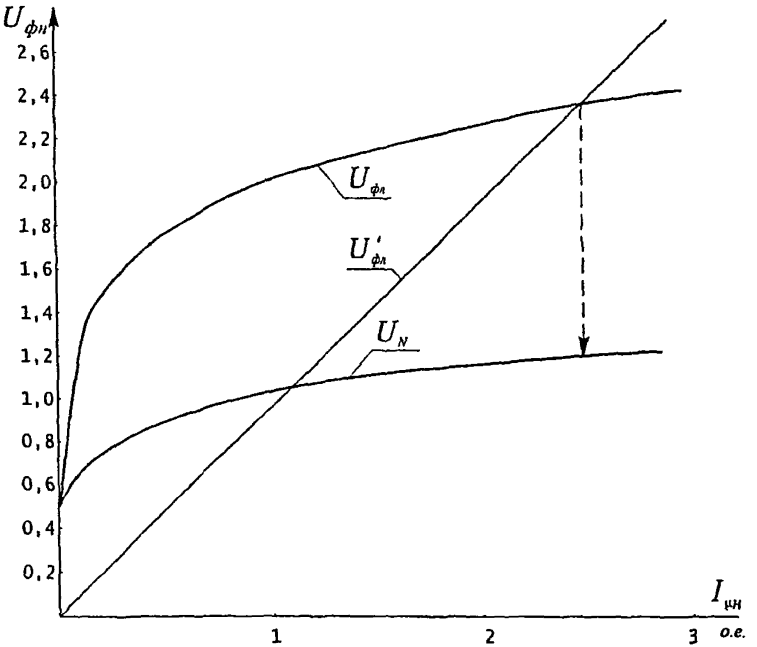


Рис.12. *Перенапряжения на линии и на нейтрали трансформатора при неполнофазном режиме линии 110 кВ с трансформатором с разомкнутой нейтралью.*

Приложения

Приложение 1

Нормированные испытательные напряжения силовых трансформаторов с номинальной изоляцией, кВ (ГОСТ 1516.3)

Класс напряжения обмотки	Испытательные напряжения																
	Грозовые импульсы						Коммутационного импульса				Кратковременные промышленной частоты						Длит пром частоты
											Одноминутные			При плановом подъеме			
	Внутренней изоляции			Внешней изоляции			Внутренней изоляции		Внешней изоляции		Внутренней изоляции			Внешней изоляции (в сухом состоянии)			Внутр изол
	Каждого линейного зажима (поочередно)		Зажима нейтрали (2)	Каждого линейного зажима (поочередно)		Каждого линейного зажима (поочередно)	Каждого линейного зажима (поочередно)	Между линейными зажимами разных фаз (1)	Каждого линейного зажима отн земли	Между линейными зажимами разных фаз (1)	Каждого линейного зажима отн.земли и др обмоток	Между линейными зажимами разных фаз (1)	Зажима нейтрали (3)	Линейного зажима отн. земли	Между линейными зажимами разных фаз (1)	Зажима нейтрали (3)	Линейного зажима отн. земли
	п.и.	с.и.	п.и.	п.и.	с.и.	п.и.											
100	480	550	200	460	570	200					200	200	100	280	-	135	-
150	550	600	275	500	625	275					230	275	130	320	415	195	-
220	750	835	400	690	860	400					325	400	200	465	600	280	220
220 (4)	650	715					435				220						220
330	1050	1150	-	1000	1250	-	950	1425	950	1300	460	575	-	670	875	-	295
500	1550	1650	-	1450	1800	-	1230	1230	1230	1800	630	830	-	900	1250	-	245
500 (5)	1300	1400					1050				570						425
500 (6)	1050	1150					900				460						425

Примечания:

п.и. – полный импульс,

с.и. – срезанный импульс,

(1) – для трехфазных трансформаторов.

(2) – для соединенных в звезду обмоток класса напряжения от 110 до 220 кВ с неполной изоляцией нейтрали, допускающей работу с ее разземлением.

(3) – для обмоток класса напряжения от 110 до 220 кВ с неполной изоляцией, допускающей работу с ее разземлением.

(4), (5) – для трансформаторов АОДЦТН 167000 500/220, с облегченной изоляцией

(6) – для обмотки 500 кВ с облегченной изоляцией трансформаторов АОДЦТН 417000 750/500, выпускаемых с 1985 г..

Приложение 2

Основные электрические характеристики ограничителей перенапряжений, рекомендуемых для электрических сетей 110 кВ.

Наименование фирмы и N ТУ	Наименование типа ОПН	$U_{нр}$ ОПН,кВ/ $U_{ном}$, кВ	Полная энерго-емкость, кДж	$I_{ном}$ разрядника, кА	$I_{сраб}$ Устройства взрывобезоп., кА	$U_{ост}$, кВ при коммут. импульсе при токе 500 кА (1000А)**	$U_{ост}$, кВ при грозовом импульсе 5(10) кА**	I коммутац. волны, кА	Длина пути тока утечки см/кВ*	Прочие факторы
НПО"Электрокерамика" (в т.ч. АО"КФЗ") 3414-019-04682628-97 3414-011-04682628-96	ОПН-110 В УХЛ1	73/	125	5	20	185(192)	250(280)	0,28	1,80	Наличие еще одной модификации по длине пути тока утечки
	ОПН-110 II УХЛ1	73/	150			126(234)	285(320)			
СП "АББ-УЭТМ" 16-97 N 1БП.768 004 ТУ	Exlim R-096 AM123	77/96	240	10	50	224(232)	240(256)	0,55	2,00	Наличие еще 3-х модификаций по $U_{кр}$, $U_{ном}$ длине пути тока утечки
	Exlim Q-108 AM123	84/108	486		65	211(216)	246(260)	0,9		
ЗАО"Феникс-88" 3414-007-06968694-97	ОПН-110/73-10IIУХЛ1	73/91	228	10	40	176(182)	206(222)	0,6	1,80	Возможны модификации по длине пути тока утечки
	ОПН-110/80-10IIУХЛ1	80/100	250			193(199)	226(243)			
	ОПН-110/88-10IIУХЛ1	88/110	275			212(219)	249(267)			
ООО "Таврида-Электрик" ИТЕА.674361.005ТУ	ОПН-У/TEL-110/73УХЛ1	73/100	165	10	20	183	218(233)	0,45	2,25	Возможны модификации по длине пути тока утечки
	ОПН-У/TEL-110/77УХЛ1	77/105	174			193	230(246)			
	ОПН-У/ TEL-110/84УХЛ1	84/115	190			211	251(269)			
ООО"АФ-Полимер" ОПНп-000/000.00.00 001ТУ ТУ16-99	ОПНп-110/300-III-УХЛ1-П1/01	73/98,5	114	10	20	190(205)	225(242)	0,3	2,50	Возможны модификации по длине пути тока утечки
	ОПНп-110/350-III-УХЛ1-П2/02	77/104	143			200(216)	237(255)	0,35		
	ОПНп-110/400-III-УХЛ1-П1/01	73/98,5	154			190(205)	225(242)	0,4		
	ОПНп-110/420-III-УХЛ1-П2/02	77/104	171			200(216)	237(255)	0,42		

* - базовое исполнение

** - усредненное значение характеристик может находиться в диапазоне +/-2%.

*** - для ОПН НПО "Электрокерамика" значения остающихся напряжений приведены для импульса тока 1,2/2,5 мс с соответствующей амплитудой

Приложение 3

Основные электрические характеристики ограничителей перенапряжений рекомендуемых для электрических сетей 150 кВ.

Наименование фирмы и N ТУ	Наименование типа ОПН	$U_{н.р.}$ ОПН,кВ/ $U_{ном}$, кВ	Полная энерго-емкость, кДж	$I_{ном}$ разрядника, кА	$I_{сраб}$ Устройства взрывобезоп., кА	$U_{ост}$, кВ при коммут. импульсе при токе 1000 кА**	$U_{ост.}$, кВ при грозовом импульсе 10 кА **	Длина пути тока утечки см/кВ*	Прочие факторы
НПО"Электрокерамика" (в т.ч. АО"КФЗ")3414-014-04682628-96	ОПН-150 УХЛ1	100/	215	10	нет	263	365	1,80	Наличие еще одной модификации по длине пути тока утечки
СП "АББ-УЭТМ" 16-97 N 1БП.768 004 ТУ	Exlim R-106	106/132	330	10	40	284	352	2,00	Наличие еще 3-х модификаций по $U_{нр}$,$U_{ном}$ длине пути тока утечки
	Exlim Q-144 H550	144/180	810		65	358	432	2,50	
ООО"АФ-Полимер" ОПНп-000/000.00.00.001ТУ ТУ16-99	ОПНп-150/300-III-УХЛ1-П1	100/140	149	10	20		332		Возможны модификации по длине пути тока утечки
	ОПНп-150/350-III-УХЛ1-П2	106/147	183				349		
	ОПНп-150/400-III-УХЛ1- П1	100/140	202				332		
	ОПНп-150/420- III-УХЛ1- П2	106/147	222				349		

* – базовое исполнение

** – то же, что в Приложении 2.

Приложение 4

Основные электрические характеристики ограничителей перенапряжений рекомендуемых для электрических сетей 220 кВ.

Наименование фирмы и N ТУ	Наименование типа ОПН	$U_{н.р}$ ОПН,кВ/ $U_{ном}$, кВ	Полная энерго-емкость, кДж	$I_{ном}$ разрядника, кА	$I_{срвб.}$ Устройства взрывобезоп , кА	$U_{ост.}$, кВ при коммут. импульсе при токе 1000 кА** (500А)**	$U_{ост.}$, кВ при грозовом импульсе +5(10)кА **	Длина пути тока утечки см/кВ*	Прочие факторы
НПО"Электрокерамика" (в т.ч. АО"КФЗ") 3414-014-04682628-96	ОПН-220 УХЛ1	146/	370	5	20	376(363)	460(500)	1,80	Наличие еще одной модификации по длине пути тока утечки
	ОПН-220 II УХЛ1	146/	450			454(439)	525	2,30	
СП "АББ-УЭТМ" 16-97 N 1БП.768 004 ТУ	Exlim Q-192 CM245	154/192	864	10	65	382(374)	436(461)	2,00	Наличие еще 3-х модификаций по $U_{мрз}$,$U_{ком}$ длине пути тока утечки
	Exlim Q-216 CM245	174/216	972			430(421)	491(519)	2,50	
ЗАО"Феникс-88" 3414-013-06968694-99	ОПН-220/146-10ПУХЛ1	146/183	458	10	40	370(358)	419(453)	1,90	Возможны модификации по длине пути тока утечки
	ОПН-220/157-10ПУХЛ1	157/196	490			399(385)	452(486)		
	ОПН-220/176-10ПУХЛ1	176/220	550			447(439)	506(545)		
ООО "Таврида- Электрик" ИТЕА.674361.005ТУ	ОПН-У/TEL-220/146УХЛ1П*	146/200	330	10	20	(366)	436(466)	2,25	Возможны модификации по длине пути тока утечки
	ОПН-У/TEL-220/154УХЛ1П*	154/210	350			(386)	460(492)		
	ОПН-У/ TEL-220/168УХЛ1П*	168/230	380			(422)	502(538)		
ООО"АФ-Полимер" ОПНп-000/000 00.00.001ТУ ТУ16-99	ОПНп-220/450-III-УХЛ1-П1	146/200	331	10	30	362(410)	452/484	2,50	Возможны модификации по длине пути тока утечки
	ОПНп-220/550-III-УХЛ1-П2	152/208	426			376(426)	470/504		
	ОПНп-220/550-III-УХЛ1-П1	146/200	393			344(355)	420/460		
	ОПНп-220/700-III-УХЛ1-П2	152/208	518			371(358)	437/479		

* – то же, что в Приложении 2.

** – то же, что в Приложении 2.

Приложение 5

Основные электрические характеристики ограничителей перенапряжений рекомендуемых для электрических сетей 330 кВ.

Наименование фирмы и N ТУ	Наименование типа ОПН	$U_{нр}$ ОПН,кВ/ $U_{ном}$, кВ	Полная энерго-емкость, кДж	$I_{ном.}$ разряд-ника, кА	$I_{сраб}$ Устройства взрыво-безоп , кА	$U_{ост.}$, кВ при коммут. импульсе при токе 1000 кА**	$U_{ост}$, кВ при грозовом импульсе 10 кА **	Длина пути тока утечки см/кВ*	Прочие факторы
НПО"Электрокерамика" (в т.ч. АО"КФЗ")3414-014-04682628-96	ОПН-150 УХЛ1	210/	1000	10	20	532	650	1,80	Наличие еще одной модификации по длине пути тока утечки
СП "АББ-УЭТМ" 16-97 N 1БП.768 004 ТУ	Exlim Q-264 AM 362	211/264	1188	10	65	525	637	2,00	Наличие еще 3-х модификаций по $U_{нр}$,$U_{ном}$ длине пути тока утечки
	Exlim T-276	221/276	2760	20	80	529	608	2,00	
ООО"АФ-Полимер" ОПНп-000/000.00.00.001ТУ ТУ16-99	ОПНп-330/700-III-УХЛ1-П1	210/274	726	10	30		668	2,50	Возможны модификации по длине пути тока утечки
	ОПНп-330/700-III-УХЛ1-П2	220/288	760				700		
	ОПНп-330/1000-III-УХЛ1- П1	210/274	1080				664		
	ОПНп-330/1000- III-УХЛ1- П2	220/288	1130				696		

– базовое исполнение

Приложение 6

Основные электрические характеристики ограничителей перенапряжений рекомендуемых для электрических сетей 500 кВ.

Наименование фирмы и N ТУ	Наименование типа ОПН	$U_{н.р}$ ОПН, кВ/ $U_{ном}$, кВ	Полная энергоемкость, кДж	$I_{ном.}$ разрядника, кА	$I_{сраб}$ Устройства взрывобезоп., кА	$U_{ост.}$, кВ при коммут. импульсе при токе 1000 кА**	$U_{ост.}$, кВ при грозовом импульсе 10 кА **	Длина пути тока утечки см/кВ*	Прочие факторы
НПО"Электрокерамика" (в т.ч. АО"КФЗ") 3414-014-04682628-96	ОПН-150 УХЛ1	330/	2270	10	20	743-750	920	1,80	Наличие еще одной модификации по длине пути тока утечки
СП "АББ-УЭТМ" 16-97 N 1БП.768 004 ТУ	Exlim P-396 EM550	318/396	2772	20	65	771	9112	2,00	Наличие еще 3-х модификаций по $U_{нр}$,$U_{ном}$ длине пути тока утечки
	Exlim T-396 AH550	318/396	3960		80	758	872		
ЗАО"Феникс-88" 3414-013-06968694-99	ОПН-500/30320ПУХЛ1	303/410	2870	20	40	755	895	2,00	Возможны модификации по длине пути тока утечки
	ОПН-500/33320ПУХЛ1	333/450	3150			830	980		
ООО"АФ-Полимер" ОПНп-000/000.00.00.001ТУ ТУ16-99	ОПНп-500/1000-III-УХЛ1-П1	303/398	1556	10	30	753	958	2,50	Возможны модификации по длине пути тока утечки
	ОПНп-500/1000-III-УХЛ1-П2	318/418	1634			790	1005		
	ОПНп-500/1500-III-УХЛ1-П1	303/398	2391			761	930		
	ОПНп-500/1500-III-УХЛ1-П2	318/418	2508			798	976		

* – базовое исполнение

** - *тоже, что в Приложении 2*

$U_{исп}$ при коммутационном импульсе трансформатора с облегченной изоляцией на стороне 500 кВ:

АОДЦТН 167000 500/220 - 900, кВ
АОДЦТН 417000 750/500 - 1050, кВ
Норм. изол.$U_{исп}$ком = 1230 кВ

Приложение 7

Основные электрические характеристики ограничителей перенапряжений рекомендуемых для электрических сетей 750 кВ.

Наименование фирмы и N ТУ	Наименование типа ОПН	$U_{кр}$ ОПН, кВ/ $U_{ном}$, кВ	Полная энерго-емкость, кДж	$I_{ном}$ раз-ряд-ника, кА	$I_{сраб}$ Устрой-ства взрыво-безоп., кА	$U_{ост}$, кВ при коммут. им-пульсе при токе 1000 кА**	$U_{ост}$, кВ при грозовом импульсе 10 кА **	Длина пути тока утечки см/кВ*	Стоим 1 фазы без НДС, у е **	Прочие факторы
НПО"Электрокерамика" (в т.ч. АО"КФЗ") ТУ 16-521.277-82	ОПН-750 У1	455/	5224	15	20	1180	1320	1,80	41625***	Возможна одна модификация ОПНО
СП "АББ-УЭТМ" 16-97 N 1БП.768 004 ТУ	Exlim T-588 AM800	462/588	5880	20	80	1125	1293	2,00	~64400	
ООО"АФ-Полимер" ОПНп-000/000.00.00.001ТУ ТУ16-99	ОПНп-750/1800-III-УХЛ1-П1	455/595	4291	20	30	1168	1396	2,50	42000	Возможны модификации по длине пути тока утечки
	ОПНп-750/2500-III-УХЛ1-П2	478/625	143				1466		50000	

* – базовое исполнение

** – приведены на июль 1999 г. При пересчете рублевых цен принималось: 1$=24/4 руб.

***– стоимость ОПН НПО "Электрокерамика" определялась в соответствии с прайс-листом, утвержденным в июле 1999г. Департаментом электрических сетей РАО "ЕЭС России" и с учетом Примечания 2 указанного прайс-листа (при предоплате денежным средствами скидки до 55%).

Приложение 8

Таблица 1.

Квазиустановившиеся перенапряжения при отключении однофазного КЗ на конце линии 500 кВ.

$X_{в\ нач.}$ Ом	Кол-во ШР на ВЛ		$L_{вл}$ = 500 км		$L_{вл}$ = 350 км		$L_{вл}$ = 250 км	
	нач.	кон.	$U_{нач.}$,ое	$U_{кон.}$,ое	$U_{нач.}$,ое	$U_{кон.}$,ое	$U_{нач.}$,ое	$U_{кон.}$,ое
60/30	1	1	0.987	1.265	0.903	1.088	–	–
	0	1	1.071	1.367	0.969	1.166	0.9	1.055
	1	0	1 .105	1.657	0.984	1 .308	0.91	1.14
	0	0	1 .206	1 .806	1.062	1.41	0.98	1.22
100/50	1	1	0.993	1.241	0.864	1.016	–	–
	0	1	1.134	1.416	0.969	1.135	0.87	0.99
	1	0	1.196	1.750	0.991	1.282	0.88	1.075
	0	0	1.407	2.049	1.131	1.456	0.994	1.2
150/75	1	1	1.007	1.234	0.83	0.953	–	–
	0	1	1 .242	1.509	0.968	1.122	0.86	0.95
	1	0	1.349	1.92	1.015	1.277	0.87	1.028
	0	0	1.797	2.525	1.250	1.56	1.037	1.218

Примечание к табл.1: для линий 110-330 кВ без ШР КУП при тех же длинах ввиду низких сопротивлений систем на 15 – 25% ниже.

Таблица 2.

Установившиеся перенапряжения при неполнофазном отключении одной фазы линии

Напряжение и конструкция фазы	Число ШР		Максимальные напряжения	Границы зоны * км
	в начале	в конце		
500 кВ, 3АС-330	1	–	1,44	160-190
	1	1	1,44	350-380
500 КВ, 3АС-500	1	–	1,59	165-200
	1	1	1,54	355-400
750 кВ, 5АС-330	1	–	1,51	115-140
	1	1	1,39	250-290
	2	1	1,42	390-420

* Границы зон, в которых не могут применяться ограничители производства КФЗ, определялись по величине КУП, равной 1,3.

Таблица 3.

Квазиустановившиеся перенапряжения при неполнофазной коммутации линии с трансформатором на конце

Напряжение,кВ конструкция фазы ВЛ мощность тр-ра, МВА	Кол-во включенных фаз ВЛ	Макс. перенапряжения		Границы опасной зоны	
		В начале ВЛ	на тр-ре	по ОПН на конце ВЛ	ПО ОПН на тр-ре
110; АС 70; 6.3 МВА	Вкл-ние 2ф	1.75	1.6	70 - 350	80 - 325
	Вкл-ние 1ф	1.60	1.39	400 - 600	325 - 400
110;АС 240; 10 МВА	Вкл-ние 2ф	2.45	2.07	110 - 480	125 -425
	Вкл-ние 1ф	2.00	2.2	400 - 700	310 -600
220; АС 240; 40 МВА	Вкл-ние 2ф	2.0	1.9	50 - 340	60 -270
	Вкл-ние 1ф	1.85	1.4	250 - 500	270 -450
220; АС 400; 63 МВА	Вкл-ние 2ф	2.15	1.95	70 - 420	80 - 360
	Вкл-ние 1ф	2.05	1.75	325 - 500	260 - 600
500; 3АС 330; 500МВА	Откл.1ф(ОШР)	2.65	2.37	60 - 420	70 - 370
	Откл.1ф(1ШР)	2.39	2.15	205 - 525	210 - 490
	Откл.2ф(ОШР)	2.45	1.7	240 - 570	290 -500
	Откл.2ф(1ШР)	2.30	1.6	400 - 750	450 - 700
	Вкл. 2ф(ОШР)	2.6	2.39	50 - 410	70 - 390
	Вкл. 2ф(1ШР)	2.39	2.15	210 - 525	225 - 490
750; 5АС 330; 1250МВА	Откл.2ф(ОШР)	2.35	2.0	190 - 600	210 - 550
	Откл.2ф(1ШР)	2.35	2.05	270 - 650	300 - 600
	Откл.1ф(ОШР)	2.35	2.29	35 - 360	50 - 350
	Откл.1ф(1ШР)	2.25	2.15	160 - 460	155 - 440
	Вкл. 2ф(ОШР)	2.35	2.28	40 - 360	50 - 350
	Вкл. 2ф(1ШР)	2.26	2.19	180 - 470	170 - 450

Для расчетов приняты минимальное и максимальное сечение проводов ВЛ и наиболее характерные типы трансформаторов для рассматриваемых классов напряжений.

В отличных от этих условий случаях приведенные данные в табл.3 можно интерполировать или экстраполировать. При этом учитывается изменение сечения проводов и индуктивного сопротивления между трансформаторными обмотками ВН и НН, соединенных по схеме звезда с заземленной нейтралью – треугольник.

По индуктивным сопротивлениям трансформаторов интерполируют возможные зоны опасных КУП: для полублочных электропередач 154кВ – по зонам для ЛЭП 110кВ и 330кВ – по зонам для ЛЭП 220кВ. В тех случаях, когда могут применяться ограничители перенапряжений с другим расчетным напряжением можно пользоваться обобщенными зависимостями величины КУП от длины линии, приведенными для наиболее тяжелого случая включения двух фаз ВЛ и отказа третьей фазы: рис.8 – для 110 кВ; рис.9 – для 220 кВ; рис.10 – для 500 кВ; рис.11 – для 750 кВ.

Экстраполяцию и интерполяцию данных проводят аналогично вышесказанному.

Приложение 9.

Таблица 1.

Наибольшие допустимые расстояния от ограничителей перенапряжений типа ОПН-110 до защищаемого оборудования обычных ОРУ и ЗРУ 110 кВ

Тип РУ, кол-во ВЛ	Кол-во комплектов ограничителей перенапряжений, *место установки*	Длина защищенного подхода с повышенным защитным уровнем, км	Расстояние, м	
			До силовых трансформаторов (автотрансформаторов)	До остального электрооборудования
РУ по схеме "блок линия – трансформатор"	Один комплект ОПН у силового трансформатора.	1,0	60	60
		1,5	100	90
		2,0	140	120
		2,5	170	140
		3,0	220	160
РУ по схеме "блок линия – 2 трансформатора"	Два комплекта ОПН у силовых трансформаторов.	1,0	100	110
		1,5	160	160
		2,0	220	180
		2,5	300	230
		3,0	360	250
РУ с двумя ВЛ и двумя трансформаторами	Два комплекта ОПН у силовых трансформаторов.	1,0	110	80
		1,5	170	160
		2,0	250	270
		2,5	330	310
		3,0	420	380
РУ с тремя и более ВЛ и двумя трансформаторами	Два комплекта ОПН у силовых трансформаторов.	1,0	110	100
		1,5	180	200
		2,0	260	300
		2,5	350	400
		3,0	440	600

Таблица 2.

Наибольшие допустимые расстояния от ограничителей перенапряжений типа ОПН-220 до защищаемого оборудования обычных ОРУ и ЗРУ 220 кВ

Тип РУ, кол-во ВЛ	Кол-во комплектов ограничителей перенапряжений, место установки	Длина защищенного подхода с повышенным защитным уровнем, км	Расстояние, м	
			До силовых трансформаторов (автотрансформаторов)	До остального электрооборудования
РУ по схеме "Блок линия – трансформатор"	Один комплект разрядников у силового трансформатора.	1,0 1,5 2,0 2,5 3,0	10 30 50 75 95	20 60 90 120 165
РУ по схеме "блок линия – 2 трансформатора"	Два комплекта разрядников у силовых трансформаторов.	1,0 1,5 2,0 2,5 3,0	30 55 90 135 180	85 145 220 300 380
РУ с двумя ВЛ и двумя трансформаторами	Два комплекта разрядников у силовых трансформаторов.	1,0 1,5 2,0 2,5 3,0	30 55 95 140 190	90 190 340 600 1000
РУ с тремя и более ВЛ и двумя трансформаторами	Два комплекта разрядников у силовых трансформаторов.	1,0 1,5 2,0 2,5 3,0	30 70 120 185 230	130 260 500 800 1000

Таблица 3.

Наибольшие допустимые расстояния от ограничителей перенапряжений типа ОПН-330 до защищаемого оборудования обычных ОРУ и ЗРУ 330 кВ

Тип РУ, кол-во ВЛ	Кол-во комплектов ограничителей перенапряжений, место установки	Длина защищенного подхода с повышенным защитным уровнем, км	Расстояние, м		
			До силовых трансформаторов (автотрансформаторов)	До трансформаторов напряжения	До остального электрооборудования
РУ по схеме "блок линия – трансформатор"	Один комплект ОПН у силового трансформатора.	2,0 2,5 3,0	40 55 75	60 75 90	85 100 120
РУ по схеме "блок линия – трансформатор"	Два комплекта ОПН. Один комплект у силового трансформатора, второй – в линейной ячейке.	2,0 2,5 3,0	90 105 120	370 390 410	1000 1000 1000
РУ с двумя ВЛ и одним трансформатором по схеме "треугольник"	Один комплект ОПН у силового трансформатора.	2,0 2,5 3,0	100 130 165	370 390 410	350 460 560
РУ с двумя ВЛ и двумя трансформаторами по схеме "треугольник"	Два комплекта ОПН у силового трансформатора	2,0 2,5 3,0	150 170 220	1000 1000 1000	1000 1000 1000
РУ с тремя и более ВЛ и одним трансформатором	Один комплект ОПН у силового трансформатора	2,0 2,5 3,0	160 230 290	1000 1000 1000	1000 1000 1000
РУ с тремя и более ВЛ и двумя трансформаторами	Два комплекта ОПН у силового трансформатора.	2,0 2,5 3,0	190 250 320	1000 1000 1000	1000 1000 1000

Таблица 4.

Наибольшие допустимые расстояния от ограничителей перенапряжений типа ОПН-500 до защищаемого оборудования обычных ОРУ и ЗРУ 500 кВ

Тип РУ, кол-во ВЛ	Кол-во комплектов ограничителей перенапряжений, место установки	Длина защищенного подхода с повышенным защитным уровнем, км	Расстояние, м		
			До силовых трансформаторов (автотрансформаторов)	До трансформаторов напряжения	До остального электрооборудования
РУ по схеме "блок линия – трансформатор"	Один комплект ОПН у силового трансформатора.	2,0 2,5 3,0	45 60 75	– – 105	40 70 90
РУ по схеме "блок линия – трансформатор"	Два комплекта ОПН. Один комплект у силового трансформатора, второй – в линейной ячейке.	2,0 2,5 3,0	90 110 130	1000 1000 1000	1000 1000 1000
РУ с двумя ВЛ и одним трансформатором по схеме "треугольник"	Два комплекта ОПН. Один комплект у силового трансформатора, второй – на шинах или в линейной ячейке.	2,0 2,5 3,0	90 120 160	– 500 1000	– – 1000
РУ с двумя ВЛ и двумя трансформаторами по схеме "четырехугольника"	Два комплекта ОПН у силовых трансформаторов.	2,0 2,5 3,0	110 140 180	– 1000 1000	– – 1000
РУ с тремя ВЛ и одним трансформатором	Один комплект ОПН у силового трансформатора.	2,0 2,5 3,0	145 190 235	– 570 1000	– – 650
РУ с тремя ВЛ и двумя трансформаторами	Два комплекта ОПН у силовых трансформаторов	2,0 2,5 3,0	160 220 290	400 1000 1000	– 500 1000

Таблица 5.

Наибольшие допустимые расстояния от ограничителей перенапряжений типа ОПН-220 *до обмоток 220 кВ автотрансформаторов (трансформаторов)* с амплитудой импульсного испытательного напряжения полной волны 650 кВ

Схема подстанции, кол-во ВЛ	Кол-во комплектов ограничителей перенапряжений, место установки	Длина защищенного тросом подхода, км	Наибольшее допустимое расстояние от ближайшего ограничителя перенапряжений до обмоток 220 кВ автотрансформаторов (трансформаторов), м	
			металлические и ж/б опоры на оттяжках	свободностоящие ж/б опоры
Тупиковая, по схеме "блок линия – трансформатор"	Один комплект ОПН у автотрансформатора (трансформатора).	2,0 2,5 3,0 и более	25 30 35	30 35 40
Тупиковая, по схеме "блок линия – трансформатор"	Два комплекта ОПН. Один комплект ОПН у автотрансформатора (трансформатора), второй – в линейной ячейке.	2,0 2,5 3,0 и более	30 40 50	40 50 70
Тупиковая, по схеме "укрупненный блок" с двумя трансформаторами	Два комплекта ОПН у автотрансформатора (трансформатора)	2,0 2,5 3,0 и более	35 50 75	55 80 100
Проходная, с двумя ВЛ и 2 трансформаторами по схеме "мостик"	Два комплекта ОПН у автотрансформатора (трансформатора)	2,0 2,5 3,0 и более	40 60 80	60 90 115
С секциями (системой) шин с тремя ВЛ и двумя трансформаторами	Два комплекта ОПН у автотрансформаторов (трансформаторов).	2,0 2,5 3,0 и более	35 60 85	60 100 140

Таблица 6.

Наибольшие допустимые расстояния от ограничителей перенапряжений типа ОПН-500 до обмоток 500 кВ автотрансформаторов (трансформаторов) с амплитудой импульсного испытательного напряжения полной волны 1300 кВ

Схема подстанции, кол-во ВЛ	Кол-во комплектов ОПН, место установки	Наибольшее допустимое расстояние от ближайшего ограничителя перенапряжений до обмоток 500 кВ автотрансформатора (трансформатора), м
Тупиковая, по схеме "блок линия – трансформатор"	Один комплект ОПН у силового трансформатора	25
Тупиковая, по схеме "блок линия – трансформатор"	Два комплекта ОПН. Один комплект ОПН у силового трансформатора, второй – в линейной ячейке.	45
Проходная, с двумя ВЛ и одним трансформатором по схеме "треугольник"	Один комплект ОПН у силового трансформатора.	55
Проходная, с двумя ВЛ и одним трансформатором по схеме "треугольник"	Два комплекта ОПН. Один комплект у силового трансформатора, второй – на шинах.	60
Проходная, с двумя ВЛ и одним трансформатором по схеме "треугольник"	Три комплекта ОПН. Один комплект у силового трансформатора, два других – в линейных ячейках.	90
Проходная, с двумя ВЛ и двумя трансформаторами по схеме "четырехугольник"	Два комплекта ОПН у силового трансформатора.	90
С секциями (системой) шин, с тремя ВЛ и одним трансформатором	Один комплект ОПН у силового трансформатора.	100
С секциями (системой) шин, с тремя ВЛ и двумя трансформаторами	Два комплекта ОПН у силовых трансформаторов.	120

Таблица 7.

Наибольшие допустимые расстояния от ограничителей перенапряжений типа ОПН-500 до обмоток 500 кВ автотрансформаторов (трансформаторов) с амплитудой импульсного испытательного напряжения полной волны 1060 кВ*

Схема подстанции, кол-во БЛ	Кол-во комплектов ОПН, место установки	Наибольшее допустимое расстояние от ближайшего ограничителя перенапряжений до обмоток 500 кВ автотрансформатора (трансформатора), м
Тупиковая, по схеме "блок линия – трансформатор"	Два комплекта ОПН. Один комплект ОПН у силового трансформатора, второй – в линейной ячейке.	–
Проходная, с двумя ВЛ и одним трансформатором по схеме "треугольник"	Три комплекта ОПН. Один комплект у силового трансформатора, два других – в линейных ячейках.	15
Проходная, с двумя ВЛ и двумя трансформаторами по схеме "четырехугольник"	Два комплекта ОПН у силовых трансформаторов, два – в линейных ячейках.	25
С секциями (системой) шин, с тремя ВЛ и одним трансформатором	Четыре комплекта ОПН. Один комплект ОПН у силового трансформатора, три – в линейных ячейках.	40
С секциями (системой) шин, с тремя ВЛ и двумя трансформаторами	Два комплекта ОПН у силовых трансформаторов.	40
С секциями (системой) шин, с тремя ВЛ и двумя трансформаторами	Пять комплектов ОПН. Два комплекта у силовых трансформаторов, три – в линейных ячейках.	75

При установке ОПН на всех отходящих ВЛ ОРУ 500 кВ может выполняться со сниженными воздушными промежутками.

Приложение 10.

Расчет установившихся перенапряжений и частотных характеристик в схеме электропередачи

Для расчета используются волновые характеристики линий. В качестве основного элемента расчета рассматривается эквивалентная индуктивность системы L_c с Э Д.С. E, к которой подключен участок линии длиной l с нагрузкой $Z_н$.

Если пренебречь активным сопротивлением для линий, то волновое сопротивление определяется как:

$$Z_\lambda = \sqrt{L/C} = \sqrt{X/Y}\ Ом, \quad \text{где}$$

L и X - удельные индуктивность в *Гн* и индуктивное сопротивление в *Ом*;

C и Y - удельные емкость в *Ф* и проводимость линии в *Сим* по прямой и нулевой последовательностям соответственно.

Постоянная распространения $\alpha = \omega\sqrt{LC}$ *рад/км*, где ω - частота колебаний (для промышленной частоты $\omega = 314$).

Напряжение в начале линии $\dot{U}_н$, в конце – $\dot{U}_к$, входное сопротивление с рассматриваемого конца линии – $\dot{Z}_{вх}$.

Для простейшего случая – отсутствия индуктивного сопротивления реактора или входного сопротивления следующего участка линии, в дальнейшем обозначаемом как "нагрузка", – входное сопротивление линии равно:

$$\dot{Z}_{вх} = -jZ \times \mathrm{ctg}\,\alpha l \quad ; \tag{1}$$

коэффициент передачи напряжения $K_l = 1/\cos\alpha l$, причем

$$\dot{U}_к = \dot{U}_н \times K_l \tag{2}$$

Входное сопротивление линии с нагрузкой на конце:

$$\dot{Z}_{вх} = -jZ_\lambda \frac{\cos\alpha l + (Z_\lambda / Z_н) \times \sin\alpha l}{\sin\alpha l - (Z_\lambda / Z_н) \times \sin\alpha l} \quad \text{или}$$

$$\dot{Z}_{вх} = -j \times Z_\lambda\ \mathrm{ctg}\,\lambda \frac{Z_н + Z_\lambda\,\mathrm{tg}\,\lambda}{Z_н - Z_\lambda\,\mathrm{ctg}\,\lambda} \tag{3}$$

$$K = (1/\cos\alpha l) + (Z_\lambda / Z_н) \times \sin\alpha l\ , \tag{4}$$

где $Z_н$ имеет знак "+" при индуктивном характере нагрузки, а "–" при емкостном.

При симметричном одностороннем включении линии:

$$\dot{U}_{н1} = \frac{E \times Z_{вх1}}{j\omega L_{c1} + Z_{вх1}}\ ; \quad \dot{U}_{к1} = \dot{U}_{н1} \times K_{l1}\ , \tag{5}$$

где L_{c1}, $Z_{вх1}$, K_{l1} – параметры линии по прямой последовательности.

Если схема состоит из нескольких участков и имеет шунтирующий реактор на их стыке, то входное сопротивление рассчитывают, "сворачивая" схему начиная с открытого конца линии. При этом входное сопротивление рассматриваемого участка принимается в качестве нагрузки для следующего (по направлению к включенному концу линии). Результирующий коэффициент передачи напряжения получается перемножением коэффициентов участков.

При одностороннем отключении несимметричного КЗ на конце линии определяются входные сопротивления схемы относительно отключенного конца линии с КЗ по прямой (обратной) $Z_{вх1}$, и нулевой $Z_{вх0}$ последовательностям, используя (3, 5) с параметрами линии и системы по этим последовательностям соответственно.

После этого определяются напряжения на поврежденных фазах на конце линии как:

$$\dot{U}'_{в1} = \dot{U}_{к1} \frac{3\,\dot{Z}_{вх0}}{\dot{Z}_{вх1} + 2\,\dot{Z}_{вх0}} \tag{6}$$

при двухфазном КЗ:

$$\dot{U}'_{к} = \dot{U}_{к1} \frac{(a^2 - 1)\,\dot{Z}_{вх0} + (a^2 - a)\,\dot{Z}_{вх1}}{2\,\dot{Z}_{вх1} + \dot{Z}_{вх0}} \tag{7}$$

При отказах во включении одной фазы выключателя, односторонне включающего линию, напряжение на контактах разомкнутого выключателя составит:

$$\dot{U} = 3E \frac{\dot{Z}_{вх\,л0} + \dot{Z}_{вх\,п0}}{\dot{Z}_{вх\,л1} + \dot{Z}_{вх\,п1} + 2\,(\dot{Z}_{вх\,л0} + \dot{Z}_{вх\,п0})}\,, \tag{8}$$

где $\dot{Z}_{вх\,л1,0}$ – входное сопротивление линии по прямой (нулевой) последовательности со стороны разрыва фазы в сторону ЭДС;

$\dot{Z}_{вх\,п1,0}$ – входное сопротивление по прямой (нулевой) последовательности со стороны разрыва в сторону разомкнутого конца линии.

Напряжение относительно земли на разомкнутой линии со стороны разрыва по последовательностям:

$$\dot{U}_{п1,2} = E \times \frac{(\dot{Z}_{вх\,л0} + \dot{Z}_{вх\,п0}) \times \dot{Z}_{вх\,п1}}{[(\dot{Z}_{вх\,л1} + \dot{Z}_{вх\,п1}) + 2\,(\dot{Z}_{вх\,л0} + \dot{Z}_{вх\,п0})] \times (\dot{Z}_{вх\,л1} + \dot{Z}_{вх\,п1})} \tag{9}$$

$$\dot{U}_{п0} = E \times \frac{\dot{Z}_{вх\,п0}}{\dot{Z}_{вх\,л1} + \dot{Z}_{вх\,п1} + 2\,(\dot{Z}_{вх\,л0} + \dot{Z}_{вх\,п0})} \tag{10}$$

Напряжение на конце линии в месте разрыва соответственно равно:

$$\dot{U} = 2\,\dot{U}_{п1} + \dot{U}_{п0}$$

Фазное напряжение $\dot{U}_{н}$ равно:

$$\dot{U}_{н} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 \tag{11}$$

Определив коэффициенты передачи напряжения на конце линии $K_{1,2,0}$ получаем:

$$\dot{U}_{к} = 2 * K_1 * \dot{U}_{н1} + K_0 * \dot{U}_{н0} \tag{12}$$

Частота собственных колебаний схемы ω_0 в зависимости от расчетных условий определяется путем построения частотных характеристик:

– для схемы симметричного одностороннего включения линии:

$$-\dot{Z}_{э} = j\omega L_{c1} + \dot{Z}_{вх1} = f(\omega)\,,$$

ω_0 находят при $Z_э = 0$ в точке пересечения частотной характеристики с осью абсцисс (можно упростить графоаналитический способ, построив прямую $Z_н = -j\omega L_{c1}$ и $\dot{Z}_{вх}$, в функции от ω, и получив в месте пересечения ω_0);

– при несимметричных КЗ графоаналитическим способом исходят из уравнений:

$$\dot{Z}_{вх1} + 2\,\dot{Z}_{вх0} = f(\omega) = 0\ ;$$

– при разрыве электропередачи аналогично решается уравнение:

$$\dot{Z}_{вх\,л1} + \dot{Z}_{вх\,п1} + 2\,(\dot{Z}_{вх\,л0} + \dot{Z}_{вх\,л0} + \dot{Z}_{вх\,п0}) = f(\omega) = 0\,.$$

Приложение 11.

В сложных случаях, при $U_y > 1,5$ или возможности длительного существования установившегося режима, проверяют соответствие выбранного ОПН условиям эксплуатации по величине временно допустимой длительности ВДНО по следующей формуле:

$$T_i = [T_{Bi} - (T_{Bi} - T_{Ai})] \times W_{КФЗ}/W_{\bullet\bullet\bullet}, \text{ где}$$

T_i – допустимое время текущего воздействия напряжения или перенапряжения на наиболее нагруженном элементе ограничителя;

$T_{Ai, Bi}$ – нормируемая допустимая длительность текущего воздействия, определяемая по зависимостям А и В на рис.1 – 4;

$W_{кфз}$ – энергоемкость ОПН, произведенных КФЗ рассматриваемого класса напряжения сети, определяемая по Приложениям 2 – 6;

$W_{\bullet\bullet\bullet}$ – энергоемкость ОПН, произведенных другой фирмой (например, АББ-УЭТМ) выбранного класса энергоемкости, определяемая по Приложениям 2 – 6, 9.

Отношение $W_{кфз}$ к $W_{\bullet\bullet\bullet}$ позволяет учитывать недоиспользованную энергию переходного процесса для увеличения допустимых длительностей временно допустимых повышений напряжения. Уравнение основано на том, что энергоемкость ОПН производства КФЗ рассчитана на поглощение только коммутационных перенапряжений данного класса сети, а энергоемкость ОПН других производителей в несколько раз больше ее. Так как энергоемкость ограничителя рассчитана на интегральное поглощение энергии, выделившейся в ОПН, в нормальном, аварийном и послеаварийном режиме, то это позволяет недополучение энергии в переходном процессе использовать для увеличения длительности (и соответственно энергии) квазиустановившегося режима.

Допускается уточнение расчета введением поправки на амплитуду и длительность волны: 0,8-0,9 – для ВЛ 500-750кВ, 0,7-0,8 – для ВЛ 220-330кВ, 0,5-0,7 – для ВЛ 110-154кВ.

Поправка тем меньше, чем короче коммутируемая линия.

НТК ЭЛ-ПРОЕКТ
ИНН 7728-042312
адрес: 117421 Москва ул.Обручева 3-1
тел/факс (095) 431-5526

Научно-техническая компания "Эл Проект" (НТК) успешно работает в области электроэнергетики и информационных технологий с 1992 г.

Основные направления деятельности компании:

- определение условий работы электротехнического оборудования ПС и ВЛ в электрических сетях 110-1150 кВ и разработка соответствующих нормативно-методических документов и технических требований на новые виды оборудования и приборы;
- подготовка основополагающих и нормативных документов по формированию единого информационного пространства, и внедрение информационных технологий в СНГ с поставками соответствующего оборудования;
- консультирование по вопросам проектирования, продвижения на рынки и эксплуатации новых технологий, приборов, оборудования и услуг;
- разработка и реализация совместных проектов между государствами Содружества и международных проектов (в том числе по линии ТАСИС и БИСТРО);
- *поиск потенциальных деловых партнеров в государствах Содружества и за рубежом;*
- оказание помощи в публикации, перевод и редактирование книг и статей, направляемых в ведущие технические издательства Западной Европы и США.

НТК располагает штатом высококвалифицированных сотрудников, имеет возможности привлекать экспертов международных организаций и имеет деловые отношения с рядом иностранных компаний, университетов и лабораторий таких как ICL International (ведущий специалист по информационным технологиям), POWERGEN (энергетические объекты "под ключ"), NORHLAMBER PLC (крупнейший поставщик вычислительной техники и комплектующих), NEKTONS (UK) (консультанты по вопросам энергетики), Лондонский Университет, Лаборатория им. Резерфорда в Оксфорде, IEE (Британский институт инженеров электриков)

Нашими услугами пользуются такие компании как:

- Технопромэкспорт
- Энергосетьпроект
- НТФ "Энергопрогресс"
- РАО "ЕЭС России"
- КБ "Реформа"
- КБ "МЕРИТ БАНК"
- МГУ им. М.В.Ломоносова
- Исполнительный комитет Электроэнергетического Совета СНГ
- АО "Кыргызэнергохолдинг"
- АО "Литовэнерго" и многие другие.

НТК "Эл Проект" предлагает Вам взаимовыгодное сотрудничество по интересующим Вас проблемам в которых мы являемся признанными специалистами.

С уважением,
Генеральный директор
Действительный член Нью-Йоркской АН А.Г.Тер-Газарян