РАО «ЕЭС РОССИИ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-35 кВ

Москва 2001

gost.e-ecolog.ru

РАО «ЕЭС РОССИИ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6–35 кВ

МОСКВА, 2001

Разработано: ОАО "Институт "Энергосетьпроект"", ОАО ВНИИЭ, НТК "ЭЛ-ПРОЕКТ" при участии ОАО «Институт Теплоэнергопроект».

Исполнители:
Ю.П. Лысков, Н.П. Антонова, О.Ю. Демина, А.В. Зуева - ОАО "Институт Энергосетьпроект"
К.П. Кузьмичева, Н.Н Беляков - ОАО ВНИИЭ
Подъячев В.Н. – ОАО «Институт Теплоэнергопроект»
А.Г. Тер-Газарян - НТК "ЭЛ-ПРОЕКТ"

Утверждено : Департаментом научно-технической политики и развития РАО "ЕЭС России" 27.04.01г.

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

Содержание

1. ВВЕДЕНИЕ.....5

2. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ.....6

3. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ.....6

4. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ ОПН.....10

5. МЕТОДИКА ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПН.....11

5.1. ВЫБОР НАИБОЛЬШЕГО ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСТИМОГО РАБОЧЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ОПН.....11

5.2. ВЫБОР НОМИНАЛЬНОГО РАЗРЯДНОГО ТОКА ОПН..13

5.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАЩИТНОГО УРОВНЯ ОГРАНИЧИТЕЛЯ.....13

5.4. ВЫБОР ЭНЕРГОЕМКОСТИ ОГРАНИЧИТЕЛЯ.....16

5.5. ВЫБОР ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ ВЗРЫВОПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА 17

5.6. ВЫБОР ДЛИНЫ ПУТИ УТЕЧКИ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ОГРАНИЧИТЕЛЯ.....17

5.7. ВЫБОР ТИПА ОГРАНИЧИТЕЛЯ.....18

6. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ОПН ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ.....20

7. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ОПН ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ.....21

7.1. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СЕТИ СН ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ.....21

7.1.1. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОПН ДЛЯ ЗАЩИТЫ СЕТИ СН, РАБОТАЮЩЕЙ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ИЛИ НЕЙТРАЛЬЮ ЗАЗЕМЛЕННОЙ ЧЕРЕЗ ДГР.....21

7.1.2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОПН ДЛЯ ЗАЩИТЫ СЕТИ СН, РАБОТАЮЩЕЙ С НЕЙТРАЛЬЮ ЗАЗЕМЛЕННОЙ ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР. 22

7.1.3. ВЫБОР ОГРАНИЧИТЕЛЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ГРУ ОТ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ. 23

7.2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОПН ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ВАКУУМНЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ..... 25

8. ПРИМЕНЕНИЕ И МЕСТО УСТАНОВКИ ОПН..... 26

9. ПРИМЕРЫ ВЫБОРА ОПН. 27

10. ЛИТЕРАТУРА. 29

РИСУНКИ. 30

ПРИЛОЖЕНИЕ 1..... 34

ПРИЛОЖЕНИЕ 2..... 47

ПРИЛОЖЕНИЕ 3..... 53

ПРИЛОЖЕНИЕ 4..... 68

1. *Введение.*

Необходимость создания методического документа, определяющего применение и выбор параметров ограничителей для защиты оборудования в электрических сетях 6-35 кВ от грозовых и коммутационных перенапряжений, обусловлена следующими причинами:

• В России заводы практически прекратили выпуск вентильных разрядников, перейдя на выпуск ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН). Основным их отличием от разрядника являются: отсутствие искровых промежутков и, соответственно, постоянное подключение к сети, а также более высокая нелинейность вольтамперной характеристики. За счет этих факторов ограничитель находится все время под напряжением сети и ток, протекающий через него, меняется от десятых долей миллиампера в нормальном режиме работы сети до сотни и тысячи ампер при воздействии коммутационных и грозовых перенапряжений. Поэтому выбор ограничителя определяется энергетическими воздействиями на него в коммутационных, грозовых и иных режимах (повышения напряжения в рабочих режимах, квазистационарных перенапряжениях).

• ОПН для электрических сетей 6-35кВ, представленные на российском рынке, изготовляются различными заводами как на основе собственных конструкторских решений, так и по лицензиям международных электротехнических концернов.

Поэтому ОПН разных заводов-изготовителей, предназначенные для применения в одном классе напряжения, имеют отличающиеся характеристики, что должно быть учтено при выборе.

• Отечественные сети 6-35 кВ работают в основном с изолированной или заземленной через дугогасительный реактор нейтралью, поэтому условия работы ОПН в этих сетях отличаются от сетей 110-750 кВ большими величинами и длительностями коммутационных и квазистационарных перенапряжений.

2. Назначение и область применения.

Настоящие "Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 6–35 кВ" (далее Указания), определяют применение и выбор основных параметров и типа ограничителей в воздушных, кабельных и смешанных сетях 6-35 кВ, а также в сетях собственных нужд (СН) станций с учетом режимов заземления нейтрали, компенсации емкостного тока замыкания на землю работы релейной защиты и противоаварийной автоматики

Настоящие указания не распространяются на выбор ОПН для установки в сетях генераторного напряжения блоков генератор-трансформатор.

Порядок действий при выборе ОПН, изложенный в настоящих Указаниях, может применяться при выборе ОПН любой фирмы. В качестве справочного материала в Приложении 1 приведены основные характеристики ОПН, выпускаемых различными производителями по техническим условиям, согласованным с РАО "ЕЭС России" [5,6,8,10-14] .

Указания предназначены для использования персоналом проектных и эксплуатационных организаций РАО "ЕЭС России", АО-энерго и электростанции, а также электросетевых объектов 6-35кВ промышленных предприятий для определения требуемых характеристик и выбора по ним типа ограничителя перенапряжений в зависимости от условий его работы в месте установки при плановой замене разрядников, техперевооружении, реконструкции и проектировании новых распределительных устройств (РУ).

Определения и обозначения.

3.1.Ограничитель перенапряжений нелинейный (ОПН, далее ограничитель), является одним из основных элементом системы защиты от перенапряжений, обеспечивающим защиту оборудования распределительного устройства (РУ) и линий от грозовых и коммутационных перенапряжений.

3.2. В настоящем документе использована следующая терминология:

3.2.1. Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя– наибольшее действующее значение напряжения промышленной частоты, которое не ограничено долго может быть приложено между выводами ограничителя. Обозначение – $U_{НРО}$, кВ действ (в каталогах зарубежных фирм – U_c).

3.2.2. Временно допустимое повышение напряжения на ограничителе – наибольшее действующее значение напряжения промышленной частоты, превышающее $U_{НРО}$, которое может быть приложено к ОПН в течение заданного изготовителем времени, не вызывая повреждения или термической неустойчивости. Обозначение – $U_{вно}$, кВ действ.

Нормируемые изготовителями зависимости $U_{вно}$ от их допустимой длительности приведены в виде линейных зависимостей "напряжение промышленной частоты–время" в полулогарифмическом масштабе в Приложении 2. Значения $U_{вно}$ даны в долях $U_{НРО}$. Часть производителей приводит такие характеристики как для случая "с предварительным нагружением" аппарата прямоугольным импульсом тока длительностью 2000мкс, так и без него.

3.2.3. Номинальное напряжение ограничителя —действующее значение напряжения промышленной частоты, которое ограничитель может выдержать в течение не менее 10 с в процессе рабочих испытаний. Номинальное напряжение должно быть не менее 1,25 наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения.

3.2.4. Остающееся напряжение ОПН (Uост) - наибольшее значение напряжения на ограничителе при протекании через него импульсного тока с данной амплитудой и длительностью фронта.

3.2.5. Защитный уровень ОПН при коммутационных перенапряжениях – остающееся напряжение на ограничителе при расчетном токе коммутационных перенапряжений. Обозначение – $U_{ост.к}$, кВ макс.

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

3.2.6. Защитный уровень ОПН при грозовых перенапряжениях – остающееся напряжение на ограничителе при протекании нормируемого тока грозовых перенапряжений. Обозначение – $U_{остг}$, кВ макс.

Нормируемая форма импульса тока – 8/20мкс, амплитуда 5 кА.

3.2.7. Номинальный разрядный ток ОПН - это максимальное значение грозового импульса тока 8/20 мкс, используемое для классификации ОПН. Обозначение - Iном, кА.

3.2.8. Удельная энергия (энергоемкость) - рассеиваемая ограничителем энергия после нагрева его до 60 °С и последующего приложения одного нормируемого импульса тока отнесенного к 1кВ наибольшего длительно допустимого рабочего (или номинального) напряжения ОПН.

Полная энергоемкость ОПН ($Э_{опн}$) - произведение нормируемой производителем удельной энергоемкости на то напряжение по отношению к которому она приведена (наибольшее рабочее длительно допустимое или номинальное напряжения ОПН). Обозначение - $Э_{опн}$, кДж.

3.2.9. Ток пропускной способности ОПН (ток большой длительности) - максимальное значение (амплитуда) прямоугольного импульса тока длительностью не менее 2000мкс, которое прикладывается к ограничителю в процессе испытаний на пропускную способность 20 раз. Обозначение - I_{2000}, А.

Значения $Э_{опн}$ и I_{2000} (прямоугольного импульса тока большой длительности) для ОПН выпускаемых по согласованным с РАО "ЕЭС России" техническим условиям приведены в Приложении 1.

3.2.10. Ток срабатывания противовзрывного устройства, т.е. устройства для сброса давления ($I_{кз\ опн}$, кА) – наибольшее значение тока, при котором в случае внутреннего повреждения ОПН не происходит взрывного разрушения его покрышки или, при ее повреждении, разлет осколков ОПН находится внутри нормируемой зоны.

при коммутации элементов сети, сопровождающих внезапное изменение ее схемы или режима. Обозначение - $U_к$, кВ макс. Описание основных видов коммутационных перенапряжений в сетях 6-35 кВ приведено в Приложении 3.

3.2.12. Квазистационарные (временные) перенапряжения – перенапряжения промышленной или близкой к ней частоты, а так же перенапряжения на высших и низших гармониках, не затухающие или слабо затухающие, возникающие как следствие коммутации элементов сети (например, замыкании на землю, обрыве провода) и ликвидирующиеся действием релейной защиты или оперативного персонала. Возникновение, величина и длительность этих перенапряжений определяются сочетанием параметров сети. Обозначение – $U_у$, кВ действ. Описание основных видов квазиустановившихся в сетях 6-35 кВ приведено в Приложении 3.

К этим перенапряжениям 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.

3.2.13. Режим заземления нейтрали. Отечественные сети 6-35 кВ работают с изолированной нейтралью, либо нейтралью заземленной через дугогасящий реактор (ДГР) или резистор.

Область применения ДГР определяется в соответствии с ПТЭ и ПУЭ.

3.2.14. Наибольшее эксплуатационное рабочее линейное напряжение в электрической сети - определяют как наибольшее возможное фазное напряжение сети, полученное на основе анализа регистрационных суточных записей или замеров при эксплуатации РУ за год, длительностью не менее 6 часов в сутки, повторяющееся не менее 2 раз в год. Обозначение – $U_{сети}$, кВ действ.

4. Основные положения по выбору параметров ОПН.

4.1. К основным выбираемым параметрам ограничителя относятся: наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, номинальный разрядный ток, энергоемкость, уровни остающегося напряжения при коммутационном и грозовом импульсе тока, величина тока срабатывания противовзрывного устройства, длина пути утечки внешней изоляции.

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

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

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

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

4.3.2. При защите от коммутационных перенапряжений ОПН могут быть установлены на присоединениях с вакуумными выключателями, коммутирующими вращающиеся машины и трансформаторы, а также в электроустановках, имеющих облегченную или ослабленную в процессе эксплуатации (например, у электродвигателей, кабелей) изоляцию.

5. Методика выбора основных параметров ОПН.

5.1. Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН.

5.1.1. В сетях 6-35 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостного тока замыкания на землю и допускающих неограниченно длительное существование однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), наибольшее рабочее длительно допустимое напряжение ограничителя выбирается равным наибольшему рабочему напряжению электрооборудования для данного класса напряжения по ГОСТ 1516.3. Их значения приведены в табл.1.

Таблица 1.

Наибольшее рабочее напряжение электрооборудования.

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

5.1.2. Если длительность однофазного замыкания на землю ограничивается, то наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение рассчитывают как:

$U^*_{\text{про}} = U_{\text{сети}} / K_t$, где

Kt - коэффициент, равный отношению допустимого изготовителем повышения напряжения в течении времени t к наибольшему длительно допустимому рабочему (или номинальному) напряжению ограничителя. Значение K_t определяют для значения $t_{ОЗЗ}$ по зависимости «допустимое повышение напряжения – время» для случая с предварительным нагружением нормируемым импульсом энергии, которую дает завод-изготовитель (см. Приложения 2).

Время существования однофазного замыкания на землю ($t_{ОЗЗ}$) определяют по данным эксплуатации для места установки ОПН.

5.1.3. Длительность существования ОЗЗ нормируется [7] в зависимости от вида электрических сетей и составляет:

- в контролируемых сетях, питаемых от турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, а также с присоединенными мощными электродвигателями, с токами однофазного замыкания на землю в генераторной цепи более 5 А - не более 0,5сек. При токе однофазного замыкания на землю ниже 5 А - 2ч и может быть увеличено до 6ч, если однофазное замыкание находится вне обмоток;
- в кабельных сетях 6-35 кВ, не содержащих присоединенных турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов и мощных электродвигателей -2ч и может быть допущено увеличение до 6ч по согласованию с энергоснабжающей организацией:
- в воздушных сетях, работающих с изолированной нейтралью или компенсацией емкостного тока замыкания на землю и не содержащих электростанций и присоединений с электродвигателями, время отключения однофазного замыкания на землю не нормируется.

5.1.4. Нормированные значения для $U_{НРО}$ действительны для температуры окружающей среды до 45° С с учетом дополнительного нагрева от солнечной радиации. Если имеются другие источники высоких температур около ограничителя, длительное время воздействующие на ОПН, например, при его внутренней установке, то увеличивают значение $U_{НРО}$.

Если температура окружающей среды превышает 45° С , то $U_{НРО}$ увеличивают на 2% для каждых 5 градусов повышения температуры окружающей среды.

5.1.5. Значение наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ограничителя ($U_{НРО}$) выбирают по номенклатуре завода-изготовителя, которое должно быть не ниже расчетных по п.п.5.1.1-5.1.4.

5.2. Выбор номинального разрядного тока ОПН.

5.2.1. Выбор номинального разрядного тока производят в случае установки ОПН для защиты от грозовых перенапряжений

5.2.2. Во всех случаях, кроме указанных в п.5.2.3. номинальный разрядный ток принимают равным 5кА.

5.2.3. Номинальный разрядный ток принимают равным 10кА в следующих случаях:

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

5.3. Определение защитного уровня ограничителя.

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

Значения выдерживаемых и испытательных напряжений различных видов оборудования в сетях 6-35кВ приведены в табл.1-3 Приложения 4.

5.3.1. Определение защитного уровня ограничителя при грозовых перенапряжениях.

5.3.1.1.Испытательное напряжение электрооборудования 6-35 кВ координируется в настоящее время с остающемся напряжением вентильного разрядника при расчетном токе координации (5кА). Поэтому остающееся напряжение ограничителей при грозовых перенапряжениях должно быть не выше остающегося напряжения вентильного разрядника группы IV или группы III по ГОСТ 16357 [4] соответственно для ОПН класса 6-10 и 35кВ, т.е. не более значений, приведенных в табл. 2.

Таблица 2.

Максимальные значения остающихся перенапряжений при грозовом импульсе ограничителей для сетей 6-35кВ.

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

5.3.1.2. При защите электрических машин (генераторов, синхронных компенсаторов и электродвигателей мощностью более 3 МВт), присоединенных к ВЛ, выполненной в соответствии с [2], значение $U_{ост}$ ограничителя, устанавливаемого на выводах электрической машины вместе с емкостью не менее 0,5 мкФ, выбирают ниже значений приведенных в табл.4.2 Приложении 4.

5.3.2. Определение защитного уровня ограничителя при коммутационных перенапряжениях.

5.3.2.1. Величина коммутационных перенапряжений определяет значение остающегося напряжения на ограничителе, которое должно быть при расчетном токе коммутационных перенапряжений не более выдерживаемого напряжения изоляции защищаемого электрооборудования ($U_{КИ}$). Значения $U_{КИ}$ для различных видов защищаемого оборудования приведены в табл. 1-3 Приложения 4.

Расчетный ток коммутационного перенапряжения зависит от вида и величины неограниченных перенапряжений. Значение этого тока и соответствующее ему значение остающегося напряжения на ограничителе определяют либо по программе расчета переходных процессов для рассматриваемой коммутации, либо, для случаев, не оговоренных в главе 7, с некоторым запасом по значению остающегося напряжения конкретного типа ОПН при коммутационном импульсе 30/60 мкс с амплитудой 500А.

$U_{остК}$ определяют для этого расчетного тока по данным табл.1-3 Приложения 1.

5.3.2.2. Уровень ограничения коммутационных перенапряжений при дуговых замыканиях с 10% недокомпенсацией емкостного тока может быть определен по кривой рис.3 в зависимости от параметра f.

$f = (50\ Z/\ Uф)\times(Uф/A)^{1/\alpha}$, где

$$Z = \sqrt{\frac{1.5L}{2(C_o + C)}}$$

α- 0,04÷0,05 - степень нелинейности варисторов.

$L = Uф / 314 \times Iкз^{(3)}$

$Uф = (U_{раб\ сети}\times\sqrt{2})/\sqrt{3}$

$Iкз^{(3)}$ - трехфазный ток КЗ в месте установки ОПН

Со, См - емкость фазы на землю и между фазами ОПН

Со = Iс/ 0,942 Uф, где Iс - емкостной ток на землю в сети (А).

См = 0,27 Со- для кабеля

См = 0,4 Со - для ВЛ

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

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

5.4. Выбор энергоемкости ограничителя.

5.4.1. Расчет энергоемкости ОПН необходимо проводить в случае установки ОПН в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью для защиты от коммутационных (дуговых) перенапряжений. В этом случае наибольшие энергетические воздействия соответствуют работе ограничителя при дуговых перенапряжениях однофазного замыкания на землю.

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

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

5.4.3. Суммарная энергия, рассеиваемая ограничителем за одно замыкание, с учетом повторных замыканий может быть определена как:

$Э_{\Sigma} = n \times Э_{1}$, где

$Э_{1}$ - наибольшая энергия, рассеиваемая ограничителем в одном цикле гашение-зажигание (гашение в ноль тока промышленной частоты и повторное зажигание в момент максимума восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе), определяется из рис.1. и 2.

$n = 30\text{-}0{,}1 \times I_C$ - число зажиганий с наибольшей энергией за одно замыкание на землю, определяемое по эмпирической формуле, полученной на основе сетевых испытаний .

I_C - емкостной ток замыкания на землю для сети с изолированной нейтралью, либо ток недокомпенсации для сети с компенсацией емкостного тока замыкания на землю, определяется на основе расчета или непосредственных измерений в эксплуатации.

При установке на присоединениях RC-цепочек, I_C должно быть определено с учетом емкостей этих цепочек.

При наличии в сети токоограничивающих реакторов расчет величины $Э_1$ следует проводить с учетом их расстановки в сети, включая схемы источников питания (например, секционные реакторы).

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

$$Э_{ОПН} \geq Э_{\Sigma}$$

5.5. Выбор тока срабатывания взрывопредохранительного устройства.

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

5.6. Выбор длины пути утечки внешней изоляции ограничителя.

5.6.1. Длина пути утечки внешней изоляции ограничителя должна выбираться в зависимости от степени загрязнения по ГОСТ 9920-89 , но должна быть не менее указанной в таблице 3 длины пути утечки.

Таблица 3.

Минимальные длины пути утечки внешней изоляции ограничителей.

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

5.7. Выбор типа ограничителя.

5.7.1. Выбор типа ограничителя осуществляют в соответствии с определенными в пп.5.1-5.6. значениями параметров ОПН.

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

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

$$L_{ПР} = \frac{I_{XX\%} \times S_H}{188 C_1 \times U^2_H} \text{ [км]}, \text{ где}$$

$I_{XX\%}$ -ток холостого хода в %,

S_H, U_H - номинальные мощность [кВА] и напряжение [кВ] трансформатора.

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

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

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

На рис. 4 приведена обобщенная зависимость фазного напряжения на линии $U_{Фл}$ от тока намагничивания трансформатора I_{μ} с изолированной нейтралью при обрыве фазы этой линии (отпайки от нее). Параметры зависимости приведены в о.е.: напряжения – по отношению к номинальному напряжению трансформатора и тока по отношению к номинальному току намагничивания трансформатора (току холостого хода).

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

$$U`_{Фл} = I_{\mu н} \times I^{*}_{\mu н} \quad Y \times L \times U_{ФН}, \text{ о.е}$$

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

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

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

$I^{*}_{\mu н}$ - номинальный ток намагничивания, о.е. по отношению к номинальному току трансформатора, о.е. – из рис.4;

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

Пересечение построенной прямой $U_{Фл}$ с обобщенными зависимостями $U_{Фл}$ дает значение установившегося перенапряжения на линии. Эти перенапряжения могут существовать несколько часов.

По зависимости "допустимые повышения напряжения – время" (Приложение 2) для случая без предварительного нагружения энергией при длительности 11000 сек определяют значение K_t, рассчитывают $U^{**}_{ПРО} = U_У / K_t$. Полученное значение $U^{**}_{ПРО}$ сравнивают с выбранным в п.5.1.5. $U_{НРО}$.

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

Если $U_{НРО} < U^{**}_{НРО}$, то выбирают ОПН с новым $U_{НРО}$, удовлетворяющим условию:

$U_{НРО} \geq U^{**}_{НРО}$. Для вновь выбранного $U_{НРО}$ проводят проверку остающегося напряжения по п. 5.3.1.

6. Особенности выбора ОПН для защиты от грозовых перенапряжений.

6.1. Для защиты от грозовых перенапряжений ограничитель должен быть установлен там, где в соответствии с рекомендациями ПУЭ должен быть установлен вентильный разрядник.

6.2. Ограничитель должен быть отстроен от работы при перенапряжениях, вызванных однофазными дуговыми замыканиями на землю. Это требование выполняется при условии, если величина остающегося напряжения на ограничителе при импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой 500 А не менее приведенных в таблице 4 значений.

Таблица 4.

Класс напряжения, кВ	3	6	10	15	20	35
Напряжение на импульсе 30/60 мкс с амплитудой 500 А, не менее	9,0	18	29	43	59	99

В этом случае пропускная способность ограничителя (I_{2000}) должна быть не менее 250 А.

6.3. Если параметры ограничителя по условиям выбора защитного уровня при грозовых перенапряжениях не удовлетворяют требованиям п. 6.2. , то энергоемкость и наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя выбирают с учетом его работы при однофазном дуговом замыкании (ОДЗ), (см. п. 5.1, 5.4).

6.4. Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя, устанавливаемого на выводах электрических машин, присоединенных к ВЛ, выбирают в зависимости от времени существования однофазного замыкания на землю и характеристики «допустимое повышение напряжения - время» ОПН.

7. Особенности выбора ОПН для защиты от коммутационных перенапряжений.

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

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

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

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

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

- наибольшее рабочее напряжение сети не должно превышать 1,1 номинального напряжения электродвигателя, т.е. 6,6 кВ [7] ,

- длительность однофазного замыкания на землю не должна превышать 2 часов [7].

Учет этих условий определяет $U^*_{НРО}$ = 6 кВ.

7.1.1.2. Требуемый уровень ограничения коммутационных перенапряжений определяют по требованию ограничения перенапряжений при дуговых замыканиях на землю до уровня испыта-

обеспечивается при расчетном токе коммутационного импульса через ОПН равном 100 А. Соответственно значение U_{500} ограничителя должно быть не более 14,5-14,7 кВ.

7.1.1.3. Амплитуда импульса тока пропускной способности ограничителя на прямоугольной волне длительностью 2000 мкс зависит от величины емкостного тока замыкания на землю сети СН и определяется по п. 5.4.

При расчетах ориентируются на то, что:

- при емкостном токе замыкания на землю не более 10 А и работе сети с изолированной нейтралью (схема питания сети СН от трансформатора) или при емкостном токе до 100 А и работе сети со 100% компенсацией емкостного тока замыкания на землю амплитуда импульса тока пропускной способности должна быть не ниже 500 А.
- при емкостном токе замыкания на землю более 400 А и работе сети с компенсацией емкостного тока замыкания на землю (питание СН от шин ГРУ 6 кВ, как правило, через токоограничивающий реактор) амплитуда импульса тока пропускной способности должна быть не ниже 1000 А.

7.1.1.4. Ограничитель устанавливается на шинах СН в свободной ячейке или ячейке трансформатора напряжения (ТН) до предохранителя.

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

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

7.1.2.2. Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя выбирается, исходя из:

- наибольшее рабочее напряжение сети не должно превышать 1,1 номинального напряжения электродвигателя, т.е. 6,6 кВ [7] ,

- длительность однофазного замыкания на землю определяется временем действия релейной защиты, отключающей замыкание (см. п.5.2.). Это время не превышает обычно 5с.

7.1.2.3. Расчеты показывают, что ограничитель с $U_{ПРО}$=5,5 кВ обеспечивает уровень ограничения дуговых замыканий до 2-2,2$U_Ф$.

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

7.1.2.5. Ограничитель включается в цепь заземляющего трансформатора до выключателя.

7.1.2.6. В качестве резервного аппарата на шинах СН устанавливается дополнительный ОПН с параметрами по п.7.1.1., поскольку при отказе в действии релейной защиты и не отключении поврежденного присоединения, отключается присоединение с заземляющим трансформатором, и сеть переходит в режим работы с изолированной нейтралью.

7.1.3. Выбор ограничителя для защиты ГРУ от дуговых перенапряжений.

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

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

- наибольшее рабочее напряжение сети не должно превышать 1,05 номинального напряжения генератора, т.е. 6,9 и 11,5 кВ соответственно для ГРУ 6 и 10 кВ [7] ,

- длительность однофазного замыкания на землю не должна превышать 2 часов [7].

При выполнении указанных требований $U_{ПРО}$ должно быть не ниже 6,3 кВ и 10,5 кВ для сетей 6 и 10кВ соответственно.

7.1.3.3. Требуемый уровень ограничения перенапряжений определяется величиной испытательного эксплуатационного напряжения генератора равного $1,7\times\sqrt{2}\ U_{Н}$ кВ [9], и равного 15,1 и 25,2 кВ соответственно для ГРУ 6 и 10 кВ. Такой уровень ограничения перенапряжений обеспечивается при расчетном токе коммутационного импульса через ОПН равном 100 А. Соответственно значение U_{500} ограничителя должно быть не более 16-17 и 26-28 кВ соответственно для ГРУ 6 и 10 кВ.

7.1.3.4. При определении пропускной способности ограничителя необходимо учитывать, что РУ ГРУ имеет, как правило, секционные и линейные токоограничивающие реакторы, что увеличивает токовые и энергетические воздействия на ОПН. Расчет производят по методике п.5.4.

При расчетах ориентируются на то, что:

- при значениях емкостного тока замыкания на землю в ГРУ до 400 А, значение тока пропускная способности должно быть не менее 1000А;
- при значениях емкостного тока замыкания на землю более 400 А выбор параметров ограничителя требует выполнения расчетов с детальным учетом элементов сети.

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

чители должны быть специально подобраны изготовителем по своим характеристикам.

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

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

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

7.2.2. Не требуется защита от перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями:

- электродвигателей мощностью 1800 кВт и более.

- трансформаторов, защищенных по условию грозозащиты вентильными разрядниками или ОПН.

- трансформаторов СН в кабельных сетях, длина подключаемых кабелей которых больше или равна приведенным в таблице 5 значениям.

Таблица 5.

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

7.2.3. Для защиты электродвигателя от перенапряжений, инициируемых вакуумным выключателем, ограничитель устанавлива-

ется в сети 6 кВ СН электростанций. Поэтому выбор основных параметров ОПН производят в соответствии с п. 7.1.1.

7.2.4. При установке ограничителей в нескольких ячейках РУ СН характеристики ограничителей должны быть специально подобраны изготовителем для их параллельной работы. В этом случае ограничители будут подвержены меньшим токовым и энергетическим воздействиям при однофазных дуговых замыканиях на землю, что повысит надежность работы сети и ОПН.

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

Параметры ОПН, устанавливаемого параллельно выключателю, при длине отходящего кабеля 100-250м выбирают как для сети СН 6 кВ, работающей с изолированной нейтралью (п. 7.1.1).

Возможна установка ограничителя в ячейке выключателя в начале кабеля. В этом случае необходима проверка уровня перенапряжений на двигателе, которые не должны превышать выдерживаемый изоляцией двигателя уровень испытательных напряжений (см. рис. 4.1. Приложения 4).

8. Применение и место установки ОПН.

8.1. В кабельных сетях 6-10 кВ ограничитель может быть установлен только при отсутствии возможности возникновения резонансных перенапряжений. Резонансные условия могут выполняться в сети, работающей с изолированной нейтралью, при определенных соотношениях емкости шин (емкостного тока замыкания на землю) и числа трансформаторов напряжения. Резонанс не возникает, если емкостной ток замыкания на землю, приходящийся на один трансформатор напряжения, превышает 1 А, либо если в сети установлены трансформаторы напряжения типа НАМИ.

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

8.3. В РУ 3-10 кВ при выполнении связи трансформаторов с шинами при помощи кабелей расстояние от ОПН до трансформатора и аппаратов не ограничивается.

При применении воздушной связи с шинами РУ расстояние от ОПН до трансформатора и аппаратов не должно превышать 60 м при ВЛ на деревянных и 90 м на металлических и железобетонных опорах. В РУ 35 кВ расстояние по ошиновке, включая ответвления от ограничителя до защищаемого объекта, выбирается в соответствии с рекомендациями ПУЭ [2] как для вентильных разрядников.

При установке ограничителя в РУ должны сохраняться расстояния до заземленных и находящихся под напряжением элементов РУ в соответствии с рекомендациями ПУЭ [2].

9. Примеры выбора ОПН.

9.1. Необходимо выбрать ОПН для установки в РП 10кВ кабельной сети для защиты от коммутационных перенапряжений.

Емкостной ток замыкания на землю -200А. Сеть работает со 100% компенсацией.

Наибольшее рабочее напряжение сети по замерам составляет 10,5кВ. Значение тока трехфазного КЗ на шинах 9кА. Время отключения замыкания на землю 2 часа.

В качестве примера проведем выбор ОПН типа POLIM I фирмы АББ-УЭМ. Для длительности 2ч по зависимости «допустимое повышение напряжения – время» случай с предварительным нагружением энергией определяем K_t= 1,11.

Определяем $U^*_{ПРО} = U_{СЕТИ}/ K_t = 10,5 / 1,11 = 9,46$ кВ

Ближайшее большее значение $U_{ПРО}$ в номенклатуре завода – 10кВ.

По п.5.3.2.1. принимаем с запасом в качестве расчетного тока 500А и определяем для него в Приложении 1 для ОПН типа POLIM I остающееся напряжение коммутационного импульса тока U_{500} = 24,7кВ.

Рассчитываем энергию, поглощаемую ОПН в процессе дуговых замыканий:

- Определяем энергию одного зажигания по рис.2 для тока однофазного замыкания на землю, равном 200 А и U_{500}= 25кВ (округлили в большую сторону) $Э_1 = 0,95$кДж.

- Определяем расчетное число повторных зажиганий:

при недокомпенсации 10% значение тока недокомпенсации составит: $I_C = 200 \times 0,1 = 20$ А;

$$n = 30 - 0,1 \times I_C = 30 - 0,1 \times 20 = 28$$

$$Э_\Sigma = n \times Э_1 = 28 \times 0,95 = 26,6 \text{ кДж}$$

Энергоемкость выбранного ОПН = 55кДж, т.е. с запасом удовлетворяет требованию: $Э_{ОПН} \geq Э_\Sigma$

Ток срабатывания взрывопредохранительного устройства $I_{кз\ ОПН}$= 40кА, что больше тока короткого замыкания (9кА) в месте установки.

Таким образом, выбранный ОПН удовлетворяет параметрам, определенным в соответствии с условиями эксплуатации.

10. Литература.

1. International Standart CEI/IEC 99-4:1991. Surge arresters.Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems.

2. Правила устройств электроустановок (ПУЭ), Издание шестое, Энергоатомиздат,1986г.

3. ГОСТ 1516.3 // Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500кВ.Требования к электрической прочности изоляции.

4. ГОСТ 16357 // Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия.

5. Ограничители перенапряжений нелинейные производства ЗАО «АББ УЭТМ»: ТУ 16-97 № 1БП.768 002 ТУ- серия Pólim ; ТУ 16-97 № 1БП 768 003 ТУ- серия MWK и MWD.

6. Каталог фирмы Siemens AG 07.97 и AG 10.96.

7. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей (ПТЭ), 15-издание, М., 1997г.

8. Ограничители перенапряжений нелинейные для сетей классов напряжения до 35кВ производства ЗАО «Феникс-88». ТУ 3414-020-06968694-01.

9. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Издание шестое, М., ЭНАС, 1998г.

10. Ограничители перенапряжений нелинейные для сетей 6-10кВ производства НПО «Электрокерамика». ТУ 3414-036-04682628-98

Ограничители перенапряжений нелинейные для сетей 35кВ производства НПО «Электрокерамика». ТУ 3414-035-04682628-98.

11. Ограничители перенапряжений нелинейные типа ОПН – КС производства ТОО «Таврида-Электрик». ИТЕА.674361.001 ТУ.

12. Ограничители перенапряжений нелинейные типа ОПН-РС производства ТОО «Таврида-Электрик». ИТЕА.674361.002 ТУ.

13. Ограничители перенапряжений нелинейные для сетей 6-35кВ производства ЗАО «ЗЭТО» ХК «ЭЛВО» ТУ 3414-001-00468683-93/ ИВЕЖ.674361.016 ТУ; ТУ 3414-039-41586029-2000.

14. Ограничители перенапряжений нелинейные для сетей 0,38-35кВ производства ООО «Центр энергетических защитных аппаратов» (ЦЭЗА) ТУ 3414-001-50018531-2000.

Рисунки

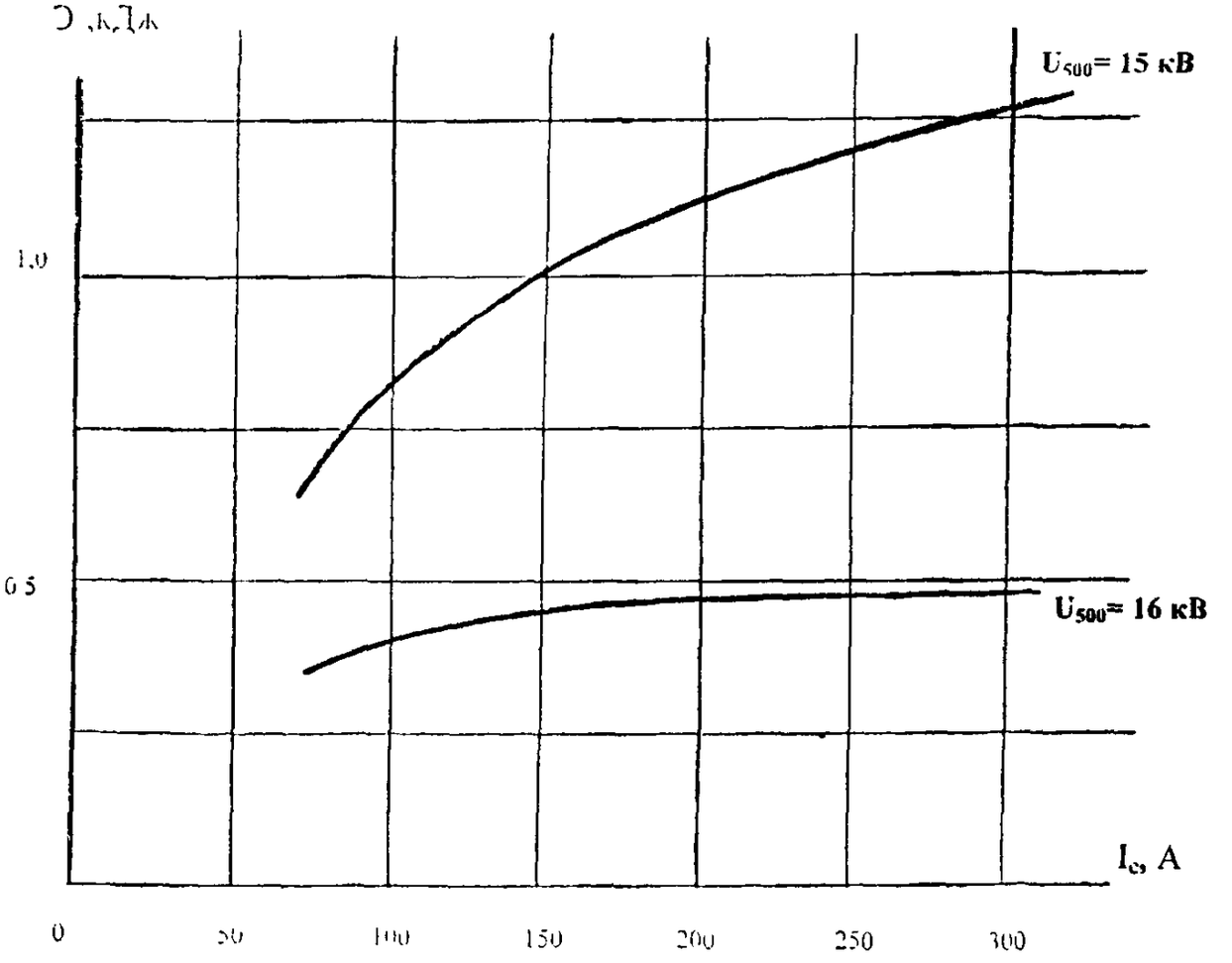


Рис 1. Обобщенные расчетные зависимости рассеиваемой ограничителем энергии за один цикл гашение-зажигание ($Э_1$) в кабельной сети 6 кВ от емкостного тока однофазного замыкания на землю (I_c) и параметра ограничителя U_{500}.

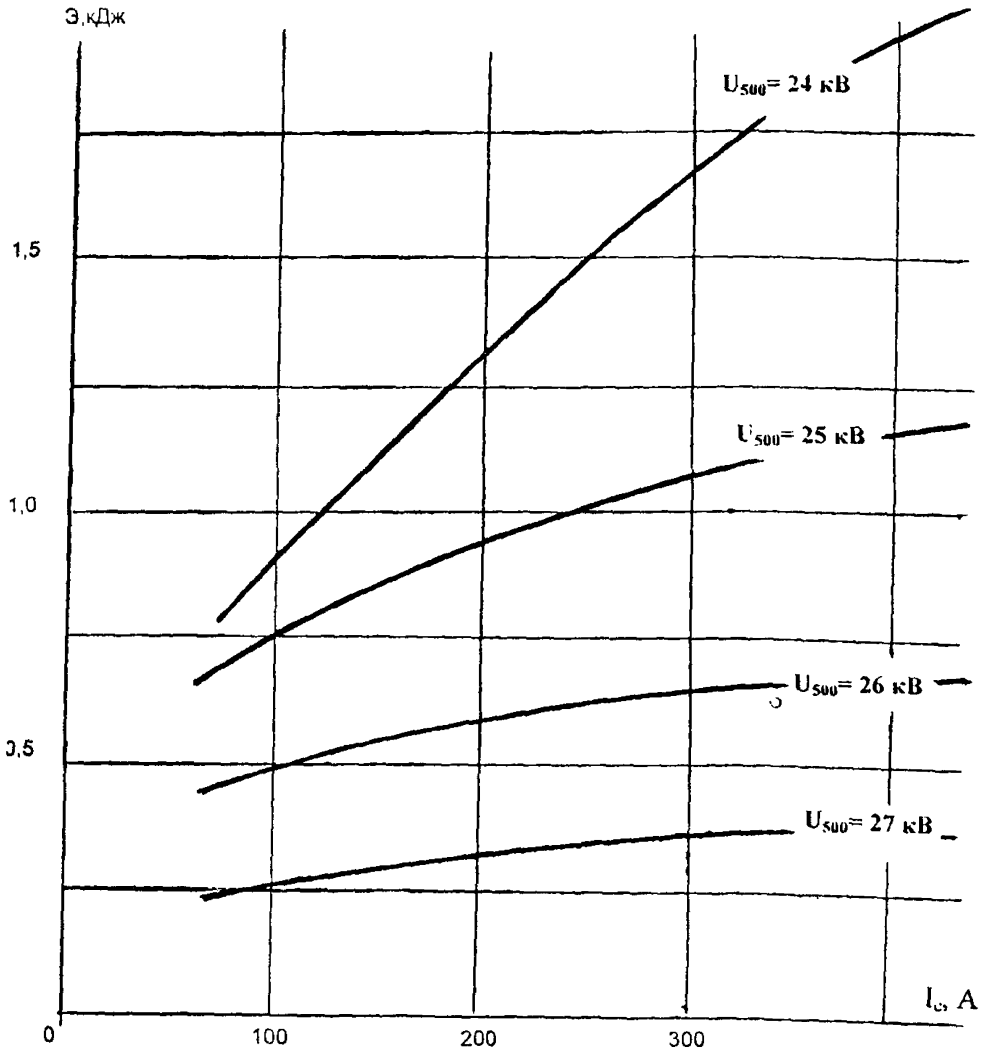


Рис.2 Обобщенные расчетные зависимости рассеиваемой ограничителем энергии за один цикл гашение-зажигание ($Э_1$) в кабельной сети 10 кВ от емкостного тока однофазного замыкания на землю (I_C) и параметра ограничителя U_{500}.

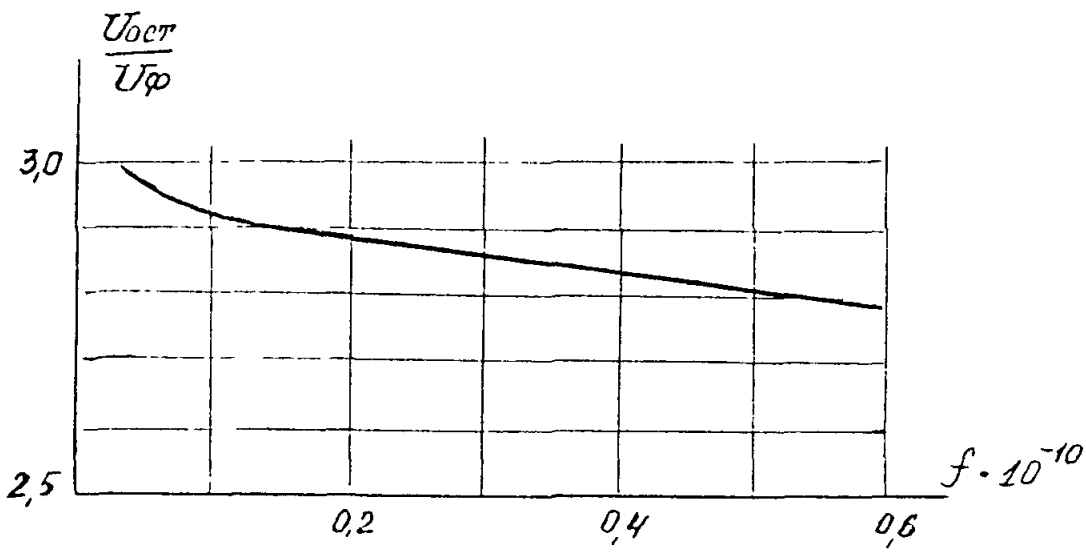
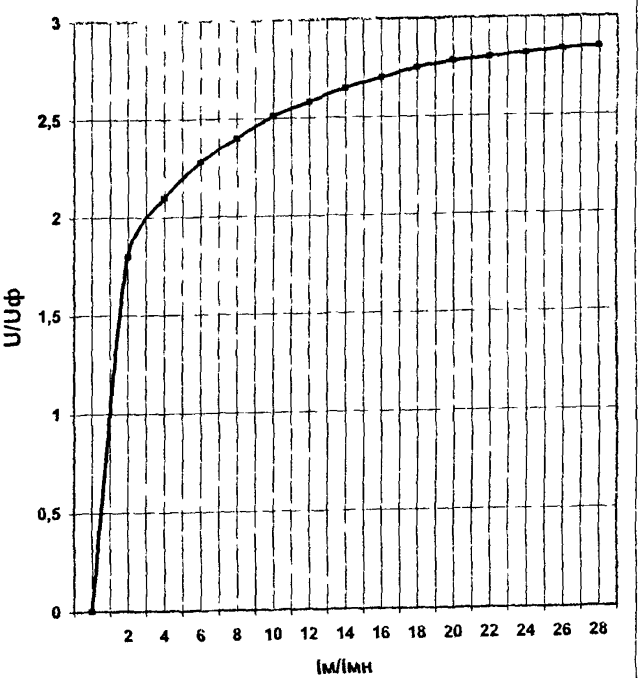


Рис .3 Зависимость уровня ограничения дуговых замыканий на землю $\left(\frac{U}{U_ф}\right)$ при 10% недокомпенсации сети от параметра $a(z\ U_{500})$

Рис 4.Типовая ВА характеристика трансформатора для сетей с изолированной нейтралью.



Приложение 1

Основные электрические характеристики ограничителей перенапряжений рекомендуемых для электрических сетей 6 кВ.

Наименование фирмы	Наименование типа ОПН	Uн.р. ОПН, кВ	Iном разрядника, кА	Uост., кВ при коммут импульсе тока 500(1000) А	Uост кВ при грозовом импульсе тока 5(10) кА	Амплитуда прямоугольного импульса тока длит 2000 мкс, А*	Полная энергоемкость кДж	Ток сраб Взрывопредохранит устройства кА	Длина пути тока утечки см	Вид изоляции
НПО"Электроке - рамика"(в т ч АО "КФЗ")	ОПН-6У1 , ОПН-6ХЛ1	7,2	5	19 (I=300А)	25	300 на волне 1 2/2 5			12.96	фарфор
	ОПН-I-6У1, ОПН-I-6ХЛ1	5,3		14 (I=300А)	19				9,54	
СП "АББ-УЭТМ"	MWK(MWK...K4)**	8	10	19,7 (20,5)	23,2(24,6)	550	28	20	26,9 (37)	полимер
	MWD *** ****								17,60	
	POLIM-I			19,8(20,6)	23,3(24,6)		44	40	48,40	
	POLIM-S			19,7(20,3)	22,8(24,0)	1000	72	65		
	GXE 7	5,6		15,7	19,3(21,8)	250		20		
	GXE 8	6,4		17,7	21,8(24,6)					
	GXE 9	7,2		19,8	24,4(27,5)					

) - для наружной установки *) - для внутренней установки ****)- выполняются ОПН с Uнр опн 6;7 кВ

Продолжение таблицы параметров для ОПН 6 кВ.

Наименование фирмы	Наименование типа ОПН	Uн.р. ОПН, кВ	Iном. разрядника, кА	Uост., кВ при коммут. импульсе тока 500(1000) А	Uост., кВ при грозовом импульсе тока 5(10) кА	Амплитуда прямоугольного импульса тока длит. 2000 мкс, А*	Полная энергоемкость, кДж	Ток сраб. Взрывопредохранит. устройства кА	Длина пути тока утечки см	Вид изоляции
ЗАО"Феникс-88"	ОПН-6/6,5-10(I)УХЛ2, ОПН-6/6,5-10(I)УХЛ1	6,5	10	15,7(16,4)	19,2(21,2)	270	9,756	10	20 (УХЛ1) 15 (УХЛ2)	полимер
	ОПН-6/7,2-10(I)УХЛ2, ОПН-6/7,2-10(I)УХЛ1	7,2		17,4(18,1)	21,2(23,5)		10,8			
	ОПН-6/5,5-10(II)УХЛ1	5,5		12,9(13,3)	15,1(16,2)	600	17,2			
	ОПН-6/6,5-10(II)УХЛ1	6,5		15,2(15,7)	17,8(19,2)		20,33			

Продолжение таблицы параметров для ОПН 6 кВ.

Наименование фирмы	Наименование типа *ОПН*	Uн.р. ОПН, *кВ*	ном. разрядника, кА	Uост., кВ при коммут. импульсе тока 500(1000) А	Uост., кВ при грозовом импульсе тока 5(10) кА	Амплитуда прямоугольного импульса тока длит 2000 мкс, А*	Полная энергоемкость, кДж	Ток сраб Взрывопредохранит. устройства , кА	Длина пути тока утечки см	Вид изоляции
ТОО"Таврида - Элек трик"	ОПН-РС 6/ 7,6УХЛ1	7,6	5	18,9 (I=250А)	23,9(25,7)	200			29	полимер
	ОПН-КС 6/ 6,0 УХЛ2	6	10	14,6	17,2(18,5)	450	24		13	
	ОПН-КС 6/ 6,9 УХЛ2	6,9		16,9	19,9(21,5)		28		13	
ХК "ЭЛВО"	ОПН-1-6/7,2 IIУХЛ1, ОПН-2-6/7,2 IIУХЛ1	7,2	5	18,7	22,5(24,5)	300	9,72	10	16,20	полимер
	ОПН-1-6/7,6 IIУХЛ1, ОПН-2-6/7,6 IIУХЛ1	7,6		19,3	23,6(25,6)		10,26		16,90	
	ОПН-П1-6IIУХЛ1	7,2	10	17,6	21,2(22,5)	400			18,00	

Продолжение таблицы параметров для ОПН 6 кВ

Наименование фирмы	Наименование типа ОПН	Uн р ОПН, кВ	Iном. разрядника, кА	Uост , кВ при коммут импульсе тока 500(1000) А	Uост , кВ при грозовом импульсе тока 5(10) кА	Амплитуда прямоугольного импульса тока длит 2000 мкс, А*	Полная энергоемкость, кДж	Ток сраб Взрывопредохранит устройства , кА	Длина пути тока утечки см	Вид изоляции
Simens	3EK7 090-4C	7,2	5	23	27,8(30,2)	300		20	49	полимер
ЦЭЗА	01,П1	7,2	5	18,8	21,9(23,5)	300	18,72	20	22,5	полимер
	02,П2		10			400	25,2			

*) Ток пропускной способности

Основные электрические характерисики ограничителей перенапряжений рекомендуемых для электрических сетей 10 кВ.

Наименование фирмы	Наименование типа ОПН	Uн р ОПН, кВ	Iном. разрядника, кА	Uост , кВ при коммут импульсе тока 500 (1000) А	Uост., кВ при грозовом импульсе тока 5(10) кА	Амплитуда прямоугольного импульса тока длит 2000 мкс , А*	Полная энергоем - кость кДж	Ток сраб. Взрывопредохранит. устройства , кА	Длина пути тока утечки см	Вид изоляции
НПО"Электрокерамика" (в т.ч.АО "КФЗ")	ОПН-10 У1, ОПН-10ХЛ1	12	5	32 (I=300A)	40				21,6	фарфор
	ОПН-I-10 У1, ОПН-I-10ХЛ1	8,9		23 (I=300A)	31				16,02	
СП "АББ-УЭТМ"	MWK(MWK ...K4)**	13	10	32,0(33,3)	37,7(39,9)	550	45,5	20	41,8 (60,1)	полимер
	MWD***,****								25,60	
	POLIM-I			32,2(33,4)	37,9(40,0)		71,5	40	86,70	
	POLIM-S			32,0(33,0)	37,1(39,0)	1000	117	65		
	GXE 15	12		32	39,4(44,4)	250		20		
	GXE 16	12,8		34,1	42(47,3)					

) - для наружной установки *) - для внутренней установки ****)-выполняются ОПН с Uнр 10;11;12 кВ

Продолжение таблицы параметров для ОПН 10 кВ.

Наименование фирмы	Наименование типа ОПН	Uн.р. ОПН, кВ	ном. разрядника, кА	Uост., кВ при коммут.импульсе тока 500 (1000) А	Uост., кВ при грозовом импульсе тока 5(10) кА	Амплитуда прямоугольного импульса тока длит. 2000 мкс, А*	Полная энергоемкость кДж	Ток сраб. Взрывопредохранит. устройства , кА	Длина пути тока утечки см	Вид изоляции
ЗАО"Феникс-88"	ОПН-10/ 10-10(I) УХЛ2, ОПН-10/ 10-10(I) УХЛ1	10	10	24,2(25,2)	29,5(32,6)	270	15	10	30 (УХЛ1) 22 (УХЛ2)	полимер
	ОПН-10/ 12-10(I) УХЛ2, ОПН-10/ 12-10(I) УХ Л1	12		29,0(30,2)	35,4(39,1)		18			
	ОПН-10/ 9,5-10(II) УХЛ1	9,5		22,2(23,0)	26,0(28,0)	600	29,75			
	ОПН-10/ 11-10(II) УХЛ1	11		25,7(26,6)	30,1(32,5)		34,5			

Продолжение таблицы параметров для ОПН 10 кВ.

Наименование фирмы	Наименование типа ОПН	Uн.р. ОПН, кВ	Iном. разрядника, кА	Uост., кВ при коммут.импульсе тока 500 (1000) А	Uост., кВ при грозовом импульсе тока 5(10) кА	Амплитуда прямоугольного импульса тока длит. 2000 мкс, А*	Полная энергоемкость кДж	Ток сраб Взрывопредохранит. устройства , кА	Длина пути тока утечки см	Вид изоляции
ТОО"Таври да -Электрик"	ОПН-РС 10 /12,7 УХЛ1	12,7	5	31,5 (I=250А)	40(42,8)	200			42	полимер
	ОПН-КС 10 /10,5 УХЛ2	10,5	10	26	30,6(33.0)	450	42		22	
	ОПН-КС 10 /11,5 УХЛ2	11,5		28	33,2(35,8)		46		22	
Simens	3EK7 150-4V	12		34,5	41,7(45,3)	300	49	20		полимер
	3EK7 180-4C	12		30,4	36,8(39,9)		60			

Продолжение таблицы параметров для ОПН 10 кВ.

Наименование фирмы	Наименование типа ОПН	Uн.р. ОПН, кВ	ном. разрядника, кА	Uост., кВ при коммут.импульсе тока 500 (1000) А	Uост., кВ при грозовом мпульсе тока 5(10) кА	Амплитуда прямоугольного импульса тока длит. 2000 мкс, А*	Полная энергоемкость кДж	Ток сраб. Взрывопредохранит устройства , кА	Длина пути тока утечки см	Вид изоляции
ХК"ЭЛВО"	ОПН-1-10/12 IIУХЛ1, ОПН-2-10/12IIУХЛ1	12	5	30,5	37(40,2)	300	16,20	10	27	полимер
	ОПН-1-10/12,7IIУХЛ1 ОПН-2-10/12,7IIУХЛ1	12,7		31,8	40(42,8)		17,15		28,6	
	ОПН-П1-6II УХЛ1	12	10	29,5	36(38)	400			30	
ЦЭЗА	01,П1	12,0	5	31	36(38,8)	300	18,72	20	37	полимер
	02,П2		10			400	25,2			

*) Ток пропускной способности

Основные электрические характеристики ограничителей перенапряжений рекомендуемых для электрических сетей 15(15,75) кВ

Наименование фирмы	Наименование типа ОПН	Uн.р. ОПН, кВ	ном. Разрядника, кА	Uост., кВ при коммут. импульсе при токе 500(1000) А	Uост., кВ при грозовом импульсе 5(10) кА	Амплитуда прямоугольного импульса тока *длит.* 2000 мкс, А*	Полная энергоемкость, кДж	Ток сраб. Взрывопредохранит. устройства, кА	Длина пути тока утечки, см/кВ	Вид изоляции
СП "АББ-УЭТМ"	MWK,MWD	18	10	44,3(46,1)	52,2(55,3)	550	63	20		полимер
	POLIM-D..N,D..L	18		49,8	58,6(63,0)	250	27	20		
	POLIM-I	18		44,5(46,2)	52,4(55,3)	550	99	40		
	POLIM-S	18		44,3(45,7)	51,3(54,0)	1000	162	65		
	POLIM-H	18		(44,4)	50,2(52,2)	1350	239	65		
	GXE23	18,4		48,3	59,5(67,1)	250	36,8			
Simens	3EK7240-4C	19,2	10	52,8	63,9(69,4)					

*) Ток пропускной способности

Основные электрические характеристики ограничителей перенапряжений рекомендуемых для электрических сетей 35 кВ

Наименование фирмы	Наименование типа ОПН	Uн р ОПН, кВ	Iном разрядника, кА	Uост , кВ при коммут импульсе тока 500 (1000) А	Uост , кВ при грозовом импульсе тока 5(10) кА	Амплитуда прямоугольного импульса тока длит 2000 мкс, А*	Полная энергоемкость, кДж	Ток сраб Взрывопредохранит устройства , кА	Длина пути тока утечки см	Вид изоляции
НПО"Электрокерамика"(в т ч. АО"КФЗ")	ОПН-35 У1,ОПН-35ХЛ1	40,5	5	100(I=350А)	126			20	72,90	фарфор
СП "АББ-УЭТМ"	MWK(MWK К4)**	41	10	100,9(104,9)	118,9 (125,8)	550	143,4	20	86,5 (129,5)	полимер
	MWD***								49,60	
	POLIM-I			101,1(105,1)	119,2 (125,9)	500	225,5	40	173 60	
	POLIM-S			100,9(104,0)	116,9 (123 0)	1000	369	65		
ЦЭЗА	01,П1	40,5	5	105	120(129)	300	18,72	20	126	полимер
	02,П2		10			400	25,2			

) - для наружной установки *) - для внутренней установки

Продолжение таблицы параметров для ОПН 35 кВ

Наименование фирмы	Наименование типа ОПН	Uн.р ОПН, кВ	Iном. разрядника, кА	Uост , кВ при коммут. импульсе тока 500 (1000) А	Uост., кВ при грозовом импульсе тока 5(10) кА	Амплитуда пря моугольного импульса тока длит 2000 мкс, А*	Полная энергоемкость, кДж	Ток сраб Взрывопредохранит. устройства , кА	Длина пути тока утечки см	Вид изоляции
ЗАО"Феникс-88"	ОПН-35/ 40,5-10 (I) УХ Л1	40,5	10	100(104)	122(134)	270	60,72	40	90	полимер
	ОПН-35/ 37-10(II) УХЛ1	37		88,4(91,4)	104(111)	600	115,8			
ХК "ЭЛВО"	ОПН-П1-35II УХЛ1	40,5	10	102	120(127)	400		10	105	полимер

Продолжение таблицы параметров для ОПН 35 кВ

Наименование фирмы	Наименование типа ОПН	Uн.р. ОПН, кВ	ном. разрядника, кА	Uост., кВ при коммут. импульсе тока 500 (1000) А	Uост., кВ при грозовом импульсе тока 5(10) кА	Амплитуда пря моугольного импульса тока длит. 2000 мкс, А*	Полная энергоемкость, кДж	Ток сраб. Взрывопредохранит. устройства , кА	Длина пути тока утечки см	Вид изоляции
ТОО"Таврида Электрик " ИТЕА. 674361.005 ТУ	ОПН-У 35 /38,5 УХЛ1	38,5	10	95	113(122)	450	85,5	20	86,60	полимер
	ОПН-У35/ 40,5 УХЛ1	40,5		100	119(128)		90		91,25	
	ОПН-У35/ 42 УХЛ1	42		104	123(133)		93,6		94,50	

***) Ток пропускной способности**

Приложение 2

Зависимость относительных величин временных повышений напряжения 50 Гц, которые должны выдерживать ограничители, от их длительности



Рис. 2.1

A - ОПН в исходном состоянии

B - ОПН при предварительном воздействии 2-х импульсов тока пропускной способности длительностью 2000 мкс с удельной поглощаемой энергией одного импульса 2.1 кДж на 1 кВ Uнр

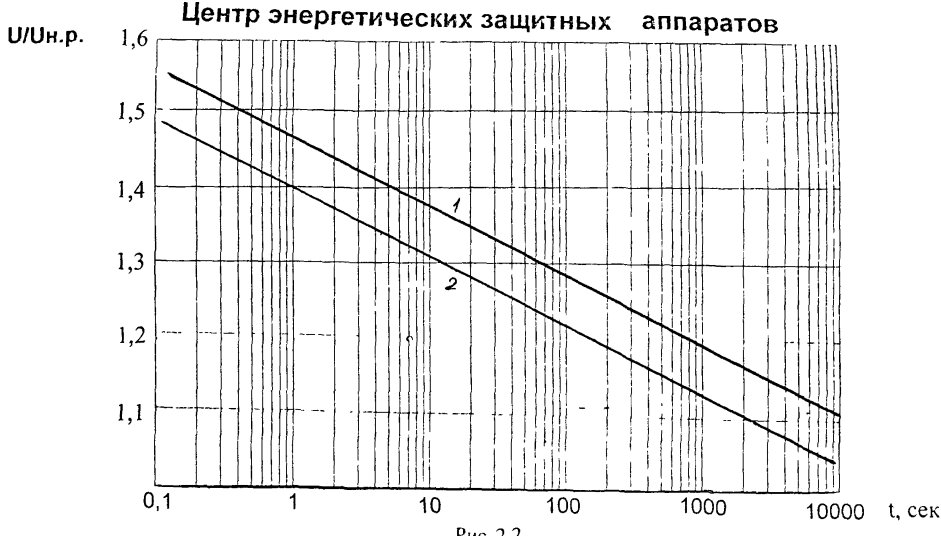


Рис. 2.2

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

2- при предварительном нагружении удельной поглащаемой энергией при температуре окружающего воздуха + 45 °С

СП «АББ-УЭТМ»

Зависимость величин временных перенапряжений промышленной частоты, которые должны выдерживать ограничители, от их длительности

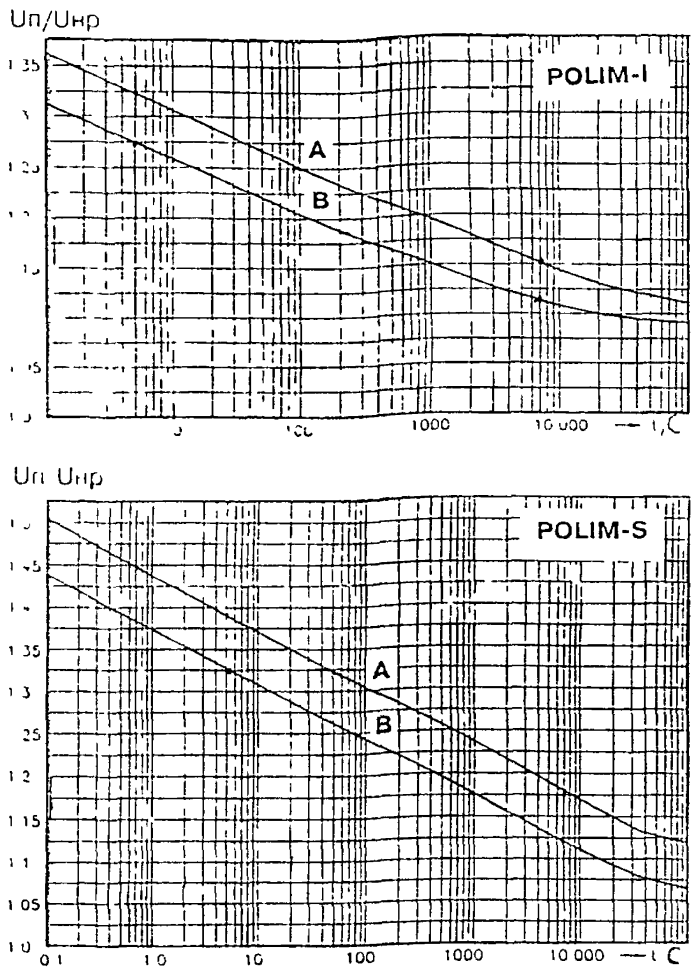
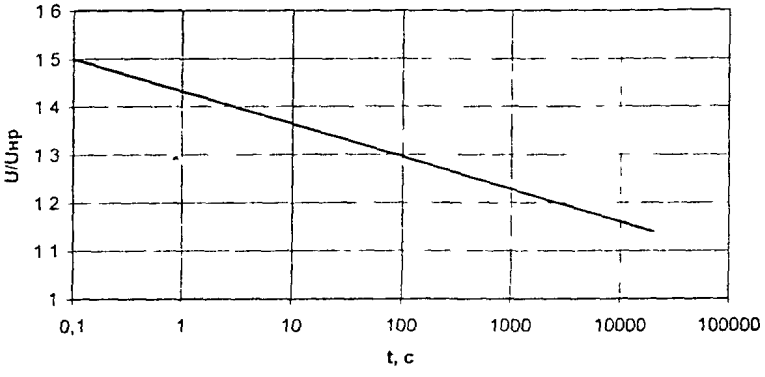


Рис. 2.3

А-в исходном состоянии при температуре окружающего воздуха +45°С, В-при предварительном нагружении удельной поглащаемой энергией при температуре окружающего воздуха +45°С, Uп - величина временного перенапряжения (деиствующее значение)

ТОО «Таврида-Электрик»

Характеристика "напряжение-время" ОПН-РС



Характеристика "напряжение-время" ОПН-КС

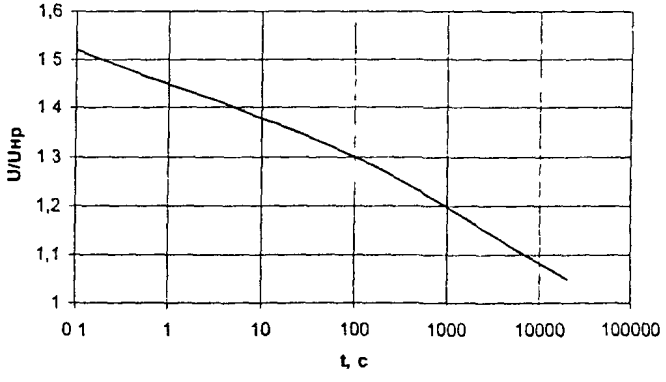


Рис 2.4

Зависимость «Допустимое напряжение- время» для ОПН типа 3ЕК 7

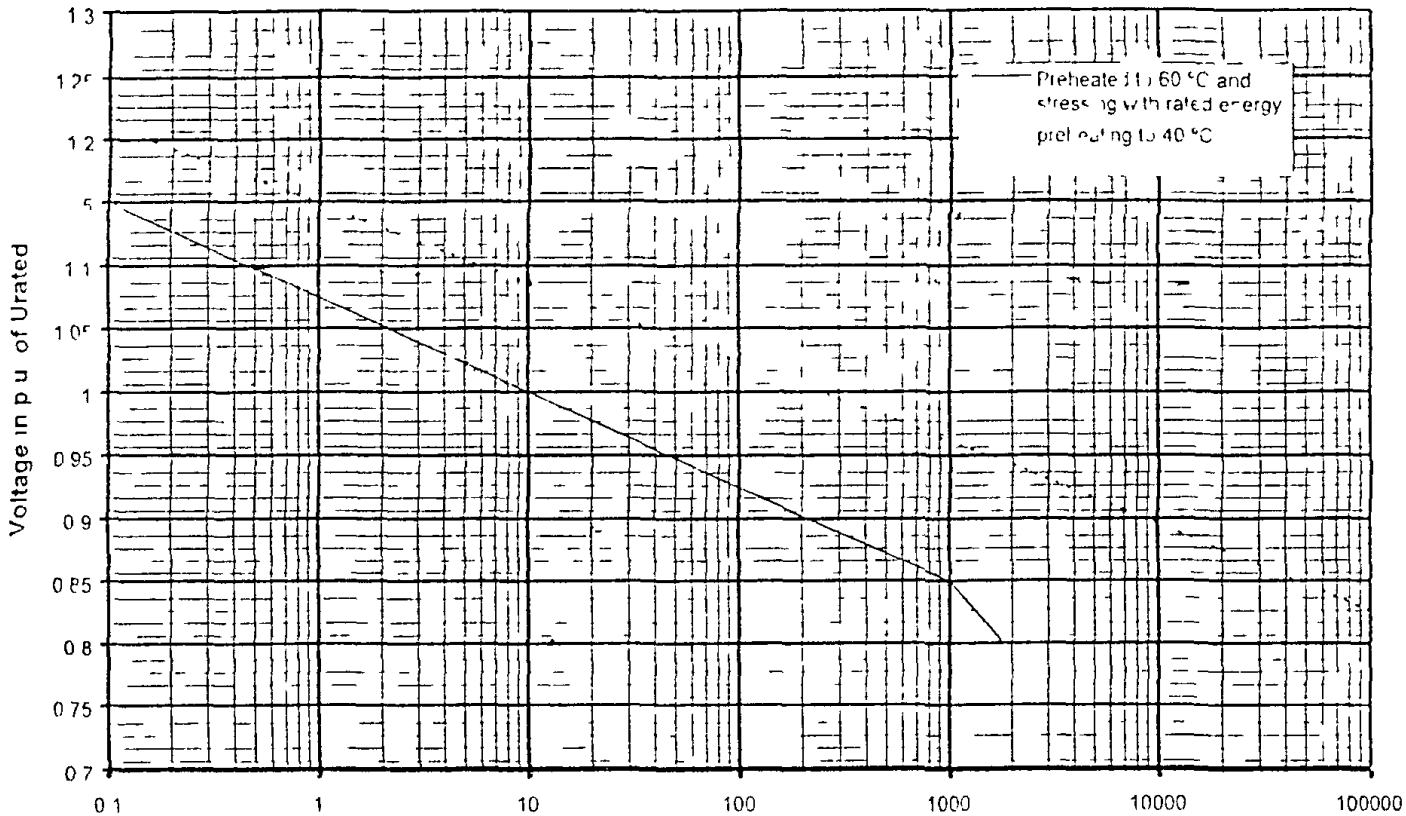
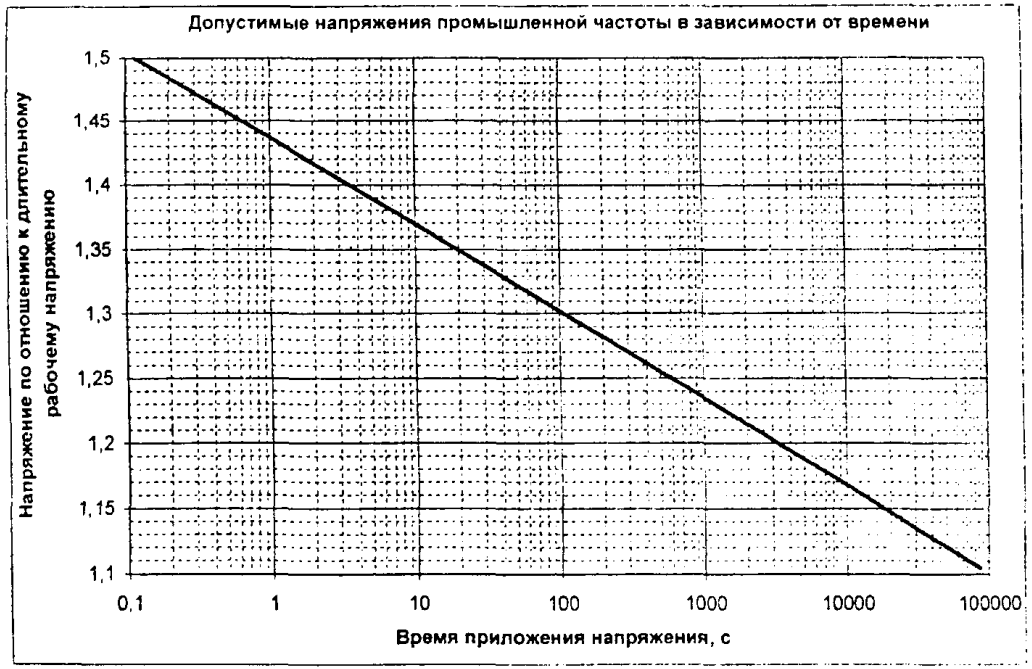


Рис 2 5



после нагрева до 60 градусов и подачи импульса

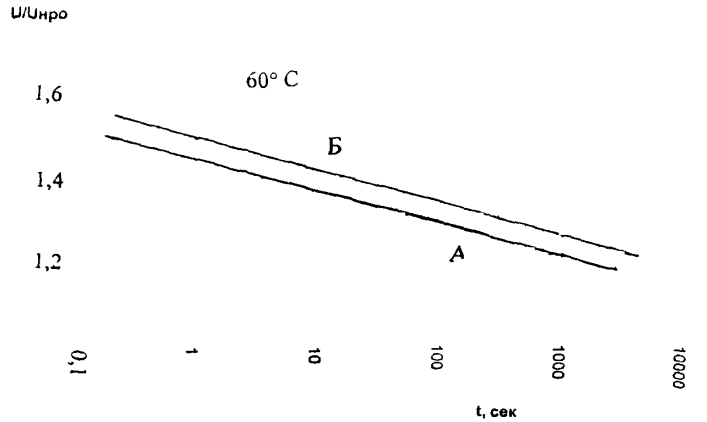
- 4/10 мкс, 100 кА для ограничителей первого класса разряда линии
- прямоугольный 2мс, 600 А для ограничителя второго класса разряда линии

Рис. 2.6

ЧК «ЭЛВО»

Зависимость «Допустимое напряжение- время»

Ограничители перенапряжений типов ОПН-П I – 3 ПУХЛ I, ОПН-П I – 6 ПУХЛ I, ОПН-П I – 10 ПУХЛ I, ОПН-П I –35 ПУХЛ I,



А – с предварительным нагружением двумя импульсами тока прямоугольной формы длительностью 2 мс амплитудой 400 А.
В- без предварительного нагружения импульсами тока.

Рис 2 7

Перенапряжения в сетях 6-35 кВ.

Сети 6-35 кВ традиционно работают с изолированной нейтралью либо с компенсацией емкостного тока замыкания на землю. Дугогасящие аппараты для компенсации емкостного тока замыкания на землю устанавливаются, если его величина превышает определенные нормированные значения : 30 А для сети 6 кВ, 20 А для сети 10 кВ и 10 А для сети 35 кВ. Сети с изолированной или компенсированной нейтралью длительно работают однофазным замыканием на землю (ОЗЗ)

В настоящее время все большее распространение получает заземление нейтрали через высокоомный резистор, сопротивление *которого имеет величину порядка емкостного сопротивления сети.* Широко применяемое резервирование питания потребителей, внедрение устройств автоматики, совершенствование технологических процессов потребителей снизили остроту требования сохранения на длительное время в работе сети при наличии «земли» В связи с этим существенно расширяется область применения в сетях 6-35 кВ защиты от однофазных замыканий с действием на отключение и применения резисторного заземления нейтрали.

В сетях с изолированной или компенсированной нейтралью возможны перенапряжения как тех же видов, что и в сетях с эффективно заземленной нейтралью (при включениях, при отключении емкостных токов, при отключении малых индуктивных токов и т.п.), так и специфических видов (при дуговых замыканиях на землю, при возникновении целого ряда резонасных и феррорезонасных схем и др)

3.1. Перенапряжения при коммутациях.

3 1 1 Включение воздушных (ВЛ) и кабельных (КЛ) линий

При включении КЛ и ВЛ в нормальном симметричном режиме перенапряжения не превышают $2{,}0U_{Ф}$. При наличии в сети ОЗЗ в процессе поиска «земли» перенапряжения увеличиваются в$\sqrt{3}$ раз, поскольку увеличивается до линейного напряжение на здоровых фазах.

3.1.2 Отключение ВЛ и КЛ

Перенапряжения при отключении ненагруженных кабельных и воздушных линий возникают при отключении с повторными зажиганиями дуги. В случаях коммутаций при наличии ОЗЗ сети, а также линий, емкость которой оказывается больше, чем емкость на землю, питающих шин и присоединений к ним перенапряжения возрастают. Максимальные перенапряжения при отключении ненагруженных КЛ и ВЛ перенапряжения могут составлять 4,0-4,3$U_ф$

3.1.3 Отключение ненагруженных трансформаторов

При отключении ненагруженных трансформаторов с изолированной нейтралью появление напряжения на нейтрали в процессе коммутации приводит к перенапряжениям (5,0-6,0)$U_ф$. Кратность перенапряжений на вторичной стороне отключаемого ненагруженного трансформатора имеет примерно ту же величину, что и на первичной.

Наибольшие перенапряжения возникают при отключении ненагруженного трансформатора сразу после его включения, когда ток холостого хода еще не достиг своего установившегося значения.

В некоторых случаях могут быть опасны перенапряжения, связанные со срезом тока, при перегорании токоограничивающих плавких вставок, если конструкция вставки недостаточно ограничивает перенапряжения.

3.1.4 Отключение двойного замыкания на землю

При отключении короткого замыкания на землю в двух разных точках сети вследствие разновременной работы выключателей могут возникнуть перенапряжения. Они образуются на первой отключившейся фазе, когда в переходном процессе напряжение изменяется от нуля до мгновенного значения линейного напряжения (на другой фазе в другом месте замыкание еще остается). Максимальные перенапряжения составляют примерно 3,3 $U_ф$.

3.1.5 Отключение двухфазных коротких замыканий.

В целом ряде схем 6-35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью при отключении двухфазных КЗ возникают пе-

ренапряжения, связанные с тем, что в момент отключения тока КЗ при его нулевом значении одновременно обрывается вблизи своего максимума и ток намагничивания ненагруженного трансформатора либо ток дугогасящего реактора Высвобождающаяся магнитная энергия заряжает емкости схемы и создает перенапряжения

Во всех случаях образования перенапряжений трансформатор должен быть ненагруженным. Перенапряжения тем больше, чем меньше емкость, оставшаяся у трансформатора Образование перенапряжений не зависит от места отключаемого КЗ (до трансформатором или за ним).

В схеме с дугогасящим реактором перенапряжения при отключении двухфазного КЗ на землю возможны в случае, если отключаемая линия на шинах – единственная Перенапряжения без учета затухания составляют

$$U_{пер} = \frac{U_ф\ \omega 0}{2\ I\omega}$$

где ω- рабочая частота, $\omega_0 = 1/\sqrt{(L_p 3C_ш)}$ – собственная частота колебаний на шинах На подстанциях, где ω может оказаться много больше ω_0, для защиты от перенапряжении потребуется установка вентильных разрядников или ОПН на дугогасительном реакторе

3 1 6 Перенапряжения при включениях электродвигателей

При включении первой фазы двигателя напряжение на емкостях не включившихся фаз кабеля устанавливается через индуктивность двигателя ($L_д$) в процессе свободных колебаний системы «кабель-двигатель», частота которых обычно находится в диапазоне 50-300 кГц, а амплитуда 1,8-2,0 $U_Ф$. Включение второи и третьей фаз отличается от включения первой наличием начальных напряжений на емкостях включаемых фаз. Включение второй или третьей фазы в момент максимума собственных колебании системы «кабель-двигатель» приводит к наибольшим напряжениям на этих фазах (3,0-3,1) $U_ф$

При включении очень мощных двигателей (1000 квт и более) кратности перенапряжений снижаются из-за снижения коэффициента отражения от обмотки.

Существенное влияние на величину перенапряжений оказывают длина кабеля и входная емкость двигателя. Увеличение длины кабеля увеличивает затухание контура, а, следовательно, и перенапряжения. Однако перенапряжения зависят также от соотношения емкости кабеля и емкости двигателя. При малых длинах кабеля емкость двигателя играет ограничивающую перенапряжения роль. С увеличением длины кабеля это ограничение уменьшается и при больших длинах (более 1000 м) не влияет на перенапряжения.

Максимальные перенапряжения имеют малую вероятность, поскольку требуют совпадения определенных факторов. Реальный разброс во времени включения фаз выключателя приводит к малой вероятности максимальных перенапряжений.

В процессе поиска «земли» в сети возможны частые отключения и включения электродвигателей в сеть с заземленной фазой. Если первой к двигателю через кабель подключается неповрежденная фаза сети, то максимальные перенапряжения на этой фазе у двигателя, определяемые высокочастотными колебаниями, могут достигать удвоенного значения амплитуды линейного напряжения т.е. 3,4 $U_ф$.

Включение второй неповрежденной фазы в момент максимума напряжения колебаний «кабель-двигатель» приводит к меньшим перенапряжениям порядка 2,7$U_ф$.

3.1.7 Включение электродвигателя в процессе АВР или АПВ

Включение двигателя в процессе АВР или АПВ при несинхронном остаточном напряжении двигателя повышает возможные перенапряжения по сравнению с простым включением. Образование перенапряжений аналогично таковым при простом включении, отличие в начальных условиях. По данным максимальные перенапряжения в процессе АВР или АПВ могут составлять 4,2 $U_ф$. Однако величина этих перенапряжений существенно зависит от величины остаточного напряжения двигателя в момент коммутации. После отключения двигателя от сети напряжение на нем уменьша-

ется постепенно, поскольку магнитный поток двигателя поддерживается за счет токов, индуктируемых в контурах ротора в момент отключения. Поскольку двигатель продолжает вращаться за счет запасенной механической энергии, в его обмотках генерируется напряжение. Это напряжение уменьшается вследствие затухания индуктируемых токов и снижения скорости вращения электродвигателя. Процесс снижения напряжения зависит от параметров электродвигателей. Время, за которое напряжение двигателя собственных нужд электростанции уменьшается до 0,4 начального значения колеблется от 0,46 до 2 с.

Величина паузы АПВ определяется выключателем. Для выключателей 6-10 кВ, которые обычно применяются в цепях двигателей собственных нужд электростанции, это время составляет не менее 0,5 с, кроме выключателя ВЭМ-6, который не предназначен вообще для работы в цикле АПВ.

Поэтому через 0,5с на двигателе остается напряжение 0,4-0,7, а через 1,0с 0,2-0,5 от начального напряжения. В этом случае максимальная величина перенапряжений при АПВ не превосходит $3,9U_{ф}$. Как и в случае простого включения вероятность таких перенапряжений мала, поскольку требует одновременного совпадения двух условий: включение первой фазы в максимум напряжения на фазе и включение второй фазы в максимум свободных колебаний системы «кабель-двигатель».

3.1.8.Отключение электродвигателей

Перенапряжения при отключении высоковольтных асинхронных электродвигателей связаны со срезом тока и повторными зажиганиями выключателя.

При отключении вращающегося двигателя после отделения двигателя от сети главный магнитный поток, связывающий обмотки статора и ротора, в первый момент остается неизменным, так как поддерживается током в роторе. Этот ток затухает постепенно. Поэтому, а также вследствие механической инерции ротора, некоторое время после отключения от сети на зажимах двигателя поддерживается почти нормальное синусоидальное напряжение 50 Гц. В

дальнейшем величина и частота этого напряжения снижается по мере затухания потока в роторе и снижения его оборотов.

После отделения двигателя от сети затухает также энергия, заключенная в полях рассеяния статора. Это происходит в форме высокочастотных колебаний в цепи из емкости на землю и индуктивности рассеяния обмотки статора.

Наложение этих двух процессов, возникающих при отключении двигателя, дает результирующее напряжение на его зажимах.

Отключение вращающегося короткозамкнутого двигателя (холостого или с номинальной нагрузкой) дает обычно умеренные перенапряжения, так как магнитная энергия главного поля исчезает не сразу, а постепенно расходуясь на нагрев обмотки ротора. Перенапряжения возникают за счет относительно небольшой энергии полей рассеяния статора. Отключение нагруженного двигателя отличается от отключения ненагруженного большим отключаемым током, поэтому в первом случае перенапряжения обычно выше.

Отключение вращающегося двигателя с замкнутой накоротко цепью ротора соответствует обычному отключению двигателя с фазным ротором из нормальной работы, а также всем отключениям двигателя с короткозамкнутым ротором.

Если двигатель, имеющий фазный ротор, отключается из вращающегося состояния при введенном пусковом сопротивлении, то главный магнитный поток спадает быстро и индуктирует в статоре напряжение выше нормального. Величина напряжения может значительно превосходить $U_ф$ (по опытным данным до 4-5 $U_ф$). Известно, что опасно отключать выключателем любого типа асинхронный двигатель с разомкнутой обмоткой фазного ротора.

В случае отключения практически неподвижного двигателя (не успевшего развернуться при пуске, заторможенного при перегрузке, загорможенного после отключения короткого замыкания в сети) возможен срез тока в выключателе. В этом случае магнитная энергия при срезе тока высвобождается полностью, что приводит к существенно большим перенапряжениям. Максимальные перенапряжения порядка 5,0-6,0 $U_ф$ возможны при отключении маломощных двигателей (100-170 кВт) с кабелями длиной не более 100м.

Уровень перенапряжений при отключении двигателей зависит от конструкции дугогасящего устройства выключателя, величины скольжения двигателя, его мощности, длины кабеля и т.п. Большую роль играет связанная с конструкцией выключателя величина тока среза.

3 1.9 Перенапряжения, инициируемые вакуумными выключателями.

При коммутациях вакуумными выключателями малых индуктивных токов (ненагруженных трансформаторов и заторможенных электродвигателей) возможны перенапряжения высоких кратностей. Перенапряжения, инициируемые вакуумными выключателями, можно подразделить на три вида:

-перенапряжения, образующиеся при срезе тока. Изготовители вакуумных выключателей предпринимают меры по снижению величины обрываемых токов, поэтому современные вакуумные выключатели способны оборвать ток обычно не более 5 А, в некоторых конструкциях выключателей не более 10 А. Наиболее высокие перенапряжения при обрыве тока 5 А возможны при отключении заторможенного (не развернувшегося) электродвигателя мощностью до 200 квт и длине кабеля до 50 м (5,0-8,0$U_Ф$). При больших мощностях электродвигателя и большей длине кабеля перенапряжения при обрыве тока ниже (2,9-2,6$U_Ф$).

- Перенапряжения при эскалации напряжения, т.е. перенапряжения, возникающие в процессе многократных повторных зажиганий и гашений дуги отключаемого тока. Возможность эскалации напряжения зависит от скорости роста межконтактной электрической прочности и момента расхождения контактов выключателя относительно нуля тока промышленной частоты. Если момент расхождения контактов относительно нуля тока промышленной частоты происходит при времени превышеющем 1,5 мс , то эскалация не возникает. Максимальные перенапряжения этого вида могут составлять 6,0-7,0$U_Ф$.

- Перенапряжения при виртуальном срезе тока. Этот вид перенапряжений наиболее опасен для изоляции. Он связан с многочисленными пробоями и гашениями дуги на первой отключившейся

фазе и, как следствие, возникновение эскалации перенапряжений на одной или двух фазах, отключаемых позднее. Кратности этих перенапряжений велики могут приводить к тяжелым повреждениям электрооборудования.

3.2. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю.

Дуговые замыкания на землю являются распространенным видом повреждения в сетях 6-35 кВ. Нарушение изоляции в какой-либо точке сети приводит к замыканию на землю, которое может быть трех видов: металлическим, через устойчивую дугу и через перемежающуюся дугу. Характер заземляющей дуги зависит от величины емкостного тока, от условий в месте образования дуги и параметров сети.

В большинстве случаев заземляющие дуги бывают устойчивыми, т.е. характеризуются непрерывным горением и напряжением поврежденной фазы, практически равным нулю. При этом перенапряжение образуется в момент возникновения замыкания на землю и составляет, как и при возникновении металлического замыкания, примерно 2,4 $U_ф$.

Заземляющая дуга может иметь прерывистый («перемежающийся») характер. Такая дуга является своего рода коммутатором, замыкания и размыкания которого приводят к перенапряжениям

Характерными особенностями перенапряжений от заземляющих дуг являются их относительно большая, по сравнению с другими видами перенапряжений, длительность, а также то, что они охватывают всю сеть данного напряжения. Эти особенности могут привести к повреждению по тем или иным причинам ослабленной изоляции.

3.2.1. Перенапряжения в сети с изолированной нейтралью

Величина перенапряжений при дуговых замыканиях на землю определяется моментами гашения и зажиганиями дуги. Перемежающиеся дуги в одних случаях могут иметь малое напряжение повторных зажиганий (заметно меньше $U_ф$), в других – характеризуются быстрым возрастанием напряжений последующих зажиганий.

Малые напряжения зажигания могут иметь место при пробое небольших промежутков в пазу электрической машины, в кабеле и т.п. При этом зажигания дуги происходят регулярно, и через некоторое время (как правило, максимум через 2-3 мин) дуга замыкания переходит в устойчивую. Окончательное погасание дуги может быть достигнуто лишь путем отключения поврежденного участка. Возникающие перенапряжения на неповрежденных фазах близки к наблюдаемым при устойчивой дуге.

Максимум перенапряжений образуется при гашении тока в момент близкий к максимуму напряжения на больной фазе. В этом случае на нейтрали сети остается максимальный заряд. В сети с изолированной нейтралью это напряжение составляет $1,0U_{\Phi}$. Повторное зажигание дуги может произойти спустя 160-180 электрических градусов, т.е. в момент, когда восстанавливающееся напряжение на больной фазе максимально и равно $2,0U_{\Phi}$. В этом случае перенапряжения составляют 3,0-3,2 U_{Φ}.

Длительность предельных перенапряжений также ограничена, потому что после серии последовательных зажиганий при все возрастающей прочности искрового промежутка дуга окончательно обрывается, либо, прожигая изоляцию и оплавляя электроды, переходит в устойчивую.

Максимальные кратности перенапряжений практически не зависят от номинального напряжения сети и величины емкостного тока. При увеличении последнего дуга может стать более устойчивой и тем снизить перенапряжения.

Наличие в сети с изолированной нейтралью трансформаторов напряжения, соединенных с землей, приводит к незначительному снижению максимально возможных перенапряжений.

3 2 2 Перенапряжения в сети с компенсацией емкостного тока на землю

При компенсации емкостного тока на землю изменяется характер восстановления напряжения на больной фазе после погасания дуги, поскольку дугогасящий реактор в нейтрали сети (ДГР) меняет величину и характер напряжения в нейтрали. В схеме с ДГР напряжение на нейтрали носит колебательный характер. Напряже-

ние на больной фазе носит характер начинающихся с нуля биений, поскольку напряжение на нейтрали сети колеблется с частотой $\omega = 1/\sqrt{(2L_p + L)\times C_0}$, где L_p, L -индуктивности ДГР и источника питания, C_0 - емкость сети на землю, и зависит от степени настройки ДГР. При недокомпенсации емкостного тока амплитуда напряжения на больной фазе в зависимости от степени недокомпенсации может составлять 1,5-1,7$U_ф$, а максимальное перенапряжение на здоровых фазах 2,7-2,8$U_ф$.

При резонансной настройке, поскольку частота разряда сети через ДГР равна промышленной (50 Гц), напряжение на дуговом промежутке нарастает очень медленно, что способствует самопогасанию дуги. Вследствие наличия затухания напряжение на нейтрали уменьшается практически до нуля, и на фазе восстанавливается напряжение равное $U_ф$. Поэтому перенапряжения на здоровой фазе при повторном зажигании в максимум напряжения на больной фазе составляет 2,3-2,4 $U_ф$. Оба обстоятельства подчеркивают важность 100% компенсации емкостного тока замыкания на землю.

В схемах с токоограничивающими реакторами на отходящих кабельных линиях и реакторами, установленных между секциями, в схемах источника питания перенапряжения могут несколько возрасти. Токоограничивающий реактор образует с емкостью нагрузки колебательный контур. В зависимости от параметров контура и степени расстройки компенсации возможно повышение напряжения промышленной частоты и перенапряжений на присоединении, где повреждение отсутствует.

Перенапряжения тем выше, чем выше процент недокомпенсации емкостного тока на землю. Перенапряжения несколько снижаются с ростом емкостного тока. Это может объяснятся двумя обстоятельствами, которые связаны с изменением частоты собственных колебаний схемы. Во-первых, рост емкостного тока замыкания на землю приводит к снижению частоты образующихся перенапряжений, что увеличивается время до образования максимума перенапряжении, следовательно, увеличивается затухание. Во-вторых, момент снижение частоты приводит к смещению максимума перенапряжения относительно максимума мгновенного значения синусоиды установившегося напряжения.

В реальных условиях момент возобновления дуги случаен и может соответствовать меньшим значениям восстанавливающегося напряжения, а, следовательно, образующиеся перенапряжения будут меньше.

3 2.3 Дуговые перенапряжения при резисторном заземлении нейтрали

Заземление нейтрали через активное сопротивление (резистор), разряжая емкость сети в промежутке между гашениями и зажиганиями перемежающейся дуги, способствует снижению дуговых перенапряжений. Это снижение зависит от отношения активной составляющей тока замыкания на землю к емкостной(I_a / I_c где $I_a = U_ф / R_N$, $I_c = U_ф 3\omega C_0$)э В пределе перенапряжения уменьшаются до величины 2,4 $U_ф$, соответствующей первому пику напряжения неповрежденной фазы при возникновении замыкания на землю.

Предельное снижение перенапряжений практически наступает при $I_a/I_c=1$; дальнейшее увеличение I_a не сказывается на величине перенапряжений. Предполагается , что активное сопротивление в нейтрали все же достаточно велико и коэффициент замыкания на землю сети остается практически равным $\sqrt{3}$.

3 2 4 Влияние активной нагрузки и батарей статических конденсаторов на перенапряжения при дуговых замыканиях на землю

Наличие подключенной к сети активной нагрузки вызывает затухание переходных процессов при дуговых замыканиях на землю и, как следствие, снижение перенапряжений.

Активной нагрузкой, потребляющей только активную мощность, являются: лампы накаливания (исключая люминесцентные), бытовые электронагревательные и электроотопительные приборы, а также электрохимическая нагрузка. В этих электрических установках нагрузка слагается из чисто активных сопротивлений. Другие виды нагрузок, хотя и увеличивают затухание переходных процессов, но в существенно меньшей степени.

Как известно, увеличение междуфазовой емкости сети приводит к снижению перенапряжения при дуговых замыканиях на землю Батареи косинусных конденсаторов, устанавливаемые непо-

ресственно на напряжении 6-35 кВ, обычно соединяются в треугольник и увеличивают тем самым междуфазовую емкость. Снижающий эффект перенапряжений проявляется тем больше, чем меньше емкостной ток замыкания на землю, поскольку в большей степени сказывается изменение междуфазовой емкости сети.

3.3. Резонансные повышения напряжения.

3.3.1. Резонансные повышения напряжения в сетях 6-10 кВ

В сетях 6-10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, возможны резонансные повышения напряжения. Причиной их являются многократные разряды емкости сети в процессе дугового замыкания, через обмотку ВН трансформатора напряжения, насыщение магнитопровода одной из фаз всех трансформаторов напряжения сети, что приводит к увеличению тока через обмотку ВН, разогреву обмотки ВН и повреждению трансформаторов напряжения. Такие повреждения наблюдаются с трансформаторами напряжения НТМИ и НОМ при однофазных дуговых замыканиях на землю в схемах с малыми токами замыкания на землю (до 1 А).

При заземлении нейтрали через ДГР или резистор феррорезонанс не возникает.

3.3.2. Рекомендации по предотвращению феррорезонансных повышений напряжения и исключению повреждений ТН в сетях 6-10 кВ

Для контроля изоляции в сетях 6-10 кВ, работающих с заземленной нейтралью, следует применять трансформаторы напряжения НАМИ-6 и НАМИ-10, устанавливаемые на шинах питающих подстанций.

Если в сети 6-10 кВ используются трансформаторы НОМ-6, НОМ-10, НТМИ-6, НТМИ-10, то следует использовать только один трансформатор напряжения на часть сети, работающей раздельно с остальными частями сети. Остальные трансформаторы напряжения, имеющиеся в сети рекомендуется вывести из работы.

Если в сети 6-10 кВ с трансформаторами напряжения НТМИ-6 или НТМИ-10 невозможно ограничиться одним трансформатором напряжения по условию работы релейной защиты или учета элек-

троэнергии, то рекомендуется замена второго НТМИ на два однофазных трансформатора напряжения НОМ-6 или НОМ-10, включаемых на два междуфазных напряжения.

Работать в сети 6-10 кВ с двумя и более трансформаторами напряжения НТМИ-6 или НТМИ-10 не рекомендуется.

Если в сети 6-10 кВ имеются трансформаторы напряжения НОМ-6 или НОМ-10, то рекомендуется использовать три однофазных трансформатора, не собранных в звезду. Каждая фаза НОМ-6 или НОМ-10 должна быть подключена к земле через резистор 10 кОм мощностью 400 Вт.

Если в сети 6-10 используются трансформаторы напряжения НТМИ-6 или НТМИ-10, то необходимо в нейтраль обмотки включить резистор 10 кОм мощностью 400 кВт. Для этого необходимо вскрыть трансформатор напряжения, вынуть активную часть из бака, отсоединить отвод нейтрали от корпуса и вывести нейтраль наружу через дополнительно устанавливаемый ввод 6 или 10 кВ.

3.3.3. Резонансные повышения напряжения в сетях 35 кВ

В сети 35 кВ, работающей с изолированной нейтралью, и емкостным током замыкания на землю, приходящимся на один ТН, не более 2 А возможны длительные резонансные повышения напряжения при ликвидации однофазного замыкания на землю или отключении ВЛ. В сети с компенсированной нейтралью резонансные повышения напряжения этого вида не возникают.

3.3.4. Рекомендации по предотвращению феррорезонанса в сетях 35 кВ

Для предупреждения возникновения феррорезонанса рекомендуется вывод из работы части трансформаторов ЗНОМ-35 с тем, чтобы величина емкостного тока в расчете на один трансформатор напряжения превысила 2 А.

Если вывод из работы части ЗНОМ-35 невозможен, например, из-за необходимости питания цепей РЗА либо счетчиков электроэнергии, рекомендуется замена ЗНОМ-35 на два однофазных трансформатора НОМ-35, включаемых на линейные напряжения сети.

3.3.5 Повышения напряжения в сетях6-35 кВ при неполнофазных режимах работы сети

При обрывах проводов воздушных линий электропередачи (ВЛ) либо отказах выключателей в сетях 6-35 кВ возникает неполнофазный режим. Часть емкости сети (оборвавшийся провод ВЛ) теряет непосредственную связь с источником питания и оказывается подключенной к нему через один или несколько трансформаторов с изолированными нейтралями. Емкости сети и оторвавшегося провода ВЛ образуют контуры с нелинейными индуктивностями фаз силовых трансформаторов, в которых возможны нелинейные колебания, сопровождающиеся длительно существующими перенапряжениями, опасными для оборудования, в первую очередь, трансформаторов напряжения и ОПН.

3.3.6 Рекомендации по предотвращению феррорезонанса при неполнофазных режимах в сетях 6-35 кВ

Для предотвращения повреждения оборудования при неполнофазных режимах сетей 6-35 кВ, работающих без дугогасящих реакторов и имеющих трансформаторы, загруженные менее чем на 10% их номинальной мощности, рекомендуется сокращение времени существования такого режима, отключая релейной защитой от источника питания поврежденный участок.

Защита должна срабатывать при напряжении на любой из фаз, равном двойному фазному наибольшему рабочему напряжению. Выдержка времени защиты должна быть больше времени выдержки всех остальных защит, действующих на отключение питающего выключателя сети. При срабатывании защиты должно отключаться питание наименее загруженных фидеров, если они известны заранее, либо питающей секции шин сети.

После отключений выключателей от действия предлагаемой защиты целесообразно их АПВ, причем, по возможности, многократное. В случаях, когда АПВ оказывается неуспешным, указанные фидеры или секция шин должны оставаться отключенными до устранения причины повышения напряжения

Поиск места повреждения необходимо производить аналогично поиску места однофазного замыкания на землю в сети. Начинать

поиск нужно отключением наименее нагруженного фидера, после чего производится оперативное включение отключившейся части сети на время, достаточное для контроля напряжений на фазах сети по щитовым вольтметрам. Если напряжение на какой-либо фазе превышает более чем в два раза величину наибольшего рабочего, снова отключают проверяемую часть сети, включают фидер, отключают следующий и повторяют эти операции до тех пор, пока не будет найдено присоединение, вызвавшее срабатывание защиты от повышения напряжения.

Приложение 4.

4.1 Выдерживаемый уровень напряжений изоляцией электрооборудования класса 3-35 кВ при коммутационных и грозовых перенапряжениях.

Уровень выдерживаемых напряжений электрооборудованием 3-35 кВ при коммутационных перенапряжениях определяется уровнем испытательных напряжений, которое нормируется ГОСТ 1516.1. [3]. В таблице 4.1. приведены испытательные напряжения электрооборудования 3-35 кВ и выдерживаемый уровень коммутационных и грозовых перенапряжений.

Переход от испытательного напряжения к выдерживаемому изоляцией электрооборудования уровню коммутационных перенапряжений определяется], исходя из одноминутного испытательного напряжения ($U_{1мин}$), которое нормируется [3]. $U_{выд}=K_{И}\times K_{К}\cdot\sqrt{2}\times U_{1мин}$, где

$K_{И}$=1,35 - коэффициент импульса, учитывающий упрочнение изоляции при более коротком импульсе по сравнению с испытательным,

$K_{К}$ - 0,9 - коэффициент кумулятивности, учитывающий многократность воздействий перенапряжений и возможное старение изоляции.

Для аппаратов $K_{И}$=1,1 и $K_{К}$=1,0.

Выдерживаемый уровень грозовых перенапряжений для электрооборудования определяется по формуле :

Uвыд = 1,1(Uпи - Uн).

Таблица 4.1

Вид оборудования	Вид изоляции электрооборудования	Класс напряжения, кВ	Наибольшее рабочее напряжение, кВ	Одноминутное испытательное напряжение ($U_{1мин}$) кВ	Выдерживаемый уровень коммутационных перенапряжений ($U_{выд}$), кВ	Испытательное напряжение полного грозового импульса ($U_{пи}$), кВ	Выдерживаемый уровень грозовых перенапряжений, кВ
1	2	3	4	5	6	7	8
Внутренняя изоляция трансформаторов	Нормальная	3	3,5	18	30,8	44	45,1
		6	6,9	25	42,7	60	59,4
		10	11,5	35	59,8	80	77,0
		15	17,5	45	63,45	108	102,3
		20	24,0	55	93,8	130	121,0
		35	40,5	85	145,5	200	181,5
	Облегченная	3	3,6	10	17,1	-	-
		6	6,9	16	27,4		-
		10	11,5	24	41,0	-	-
		15	17,5	37	63,3	-	-
		20	24,0	50	85,5	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8
Внутренняя изоляция аппаратов	Нормальная	3	3,6	24	37,2	42	42,9
		6	7,2	32	49,6	57	56,1
		10	12,0	42	65,1	75	71,5
		15	17,5	55	85,2	100	93,5
		20	24,0	65	100,7	120	110,0
		35	40,5	75	116,2	185	165,0
	Облегченная	3	3,6	10	17,1	-	-
		3*	3,6	10*	17,1	20*	18,7
		6	6,9	16	27,4		-
		6*	6,9	20*	34,2	40*	37,4
		10	11,5	24	41,0	-	-
		10*	11,5	28*	47,9	60*	55
		15	17,5	37	63,3	-	-
		15*	17,5	38*	65,1	75*	66
		20	24,0	50	85,5	-	-
		20*	24,0	50*	85,5	95*	82,5

*значения по ГОСТ 1516.3 относятся к изоляции трансформаторов и аппаратов.

4.2 Выдерживаемый уровень перенапряжений изоляцией электрических машин

При выпуске с завода изоляция вращающихся электрических машин обладает высокой электрической прочностью (испытательные напряжения приведены в табл.4.2.).

В процессе изготовления и эксплуатации электрические машины подвергаются пооперационным испытаниям повышенным напряжением.

При вводе в эксплуатацию (приемо-сдаточные испытания) одноминутные испытательные напряжения 50 Гц электрических машин составляют 0,8 от заводских испытательных напряжений (табл.4.2), установленных ГОСТ 183

При относительно высокой прочности новых машин сведения о снижении прочности изоляции машин во время эксплуатации практически отсутствуют

В эксплуатации испытательные напряжения при профилактических испытаниях для электродвигателей составляет ($U_н$ +1), а для генераторов (1,5 - 1,7) $U_о$

За рубежом выполнен большой объем исследований импульсной прочности изоляции двигателей и на основе полученных данных разработаны рекомендации по допустимым импульсным воздействиям на зажимах машин Эти рекомендации согласованы международными организациями (СИГРЭ, МЭК) и приняты практически во всех странах Принятая характеристика допустимых воздействий приведена на рис 4 1 Характеристика является нижней огибающей выдерживаемых напряжений в функции длины фронта действующего импульса напряжения Напряжения отнесены к амплитуде наибольшего рабочего фазного напряжения Uф Приведенные кратности воздействий считаются допустимыми для вращающихся машин современной конструкции, включая машины с состарившейся изоляцией

В диапазоне длин фронтов от 5 до 0,2 мкс значения выдерживаемых напряжений линейно снижается из-за неравномерного распределения напряжения вдоль обмотки

Таблица 4 2

Мощность эл Машины, кВт	Номинальное напряжение эл машины, кВ	Испытательное напряжение, кВ$_д$	Допустимое напряжение, кВ$_м$
До 1000	3,15	$2U_н$ +1 = 7,3	10,3
	6,0	$2U_н$ +1 = 13	18,4
	6,3	$2U_н$ +1 =13,6	19,2
	10,0	$2U_н$ +1 = 21	29,7
	10,5	$2U_н$ +1 = 22	31,0
Свыше 1000	3,15	$2,5U_н$ = 7,9	11,1
	6,0	$2,5U_н$ = 15	21,2
	6,3	$2,5U_н$ = 15,75	22,2
	10,0	$2U_н$ +3 = 23	32,5
	10,5	$2U_н$ +3 = 24	33,8

Таблица 4 3 Испытательные напряжения муфт силовых кабелеи с пропитаннои бумажной изоляциеи (ГОСТ 13781.0-86 Е)

Uном кВ	Соединительные муфты всех типов		Концевые муфты наружной установки				
	Напряжение постоянного тока 1 кВ		Действующее значение переменного тока кВ			Максимальное значение импульсного напряжения, кВ	
	Муфты на кабельных линиях	Муфты на отрезках кабеля	Муфты на отрезках кабеля*2	в сухом состоянии	под дождем	полная волна	срезанная волна
1	6	6	7	8	6	15	18
3	18	18	25	27	20	44	52
6	36	45	32	36	26	60	73
10	60	60	42	46	34	80	100
20	100	100	68	75	55	125	158
35	175	175	100	110	85	195	240

*1- Продолжительность испытания постоянным током 10 мин

*2 - Продолжительность испытания соединительных муфт переменным током 40

Примечания Соединительные и концевые муфты для кабелеи с пластмассовои изоляциеи должны выдерживать после монтажа на кабельной линии испытательное напряжение постоянного тока 6 Uном в течение 10 мин

2 Испытательные напряжения для концевых муфт наружной установки для кабелей с бумажной изоляцией и кабелей с пластмассовой изоляциеи на напряжение 3-6 кВ одинаковы

3 Муфты для кабелеи с пластмассовой изоляцией должны выдерживать в течение 4 ч следующие испытательные напряжения переменного тока 50 Гц

Uном кВ	0 66	1	3	6
Uисп кВ	2 5	4	8	15

Таблица 4.4 Испытательное напряжение выпрямленного тока, кВ, для кабелеи с бумажной изоляцией

Вид испытания	Кабельные линии с номинальным напряжением кВ				
	3	6	10	20	35
После прокладки и монтажа	18	36	60	100	175
После капитального ремонта	15-25	30-50	50-70	100	175
В эксплуатации	15-20	30-50	50-70	80-100	150-175

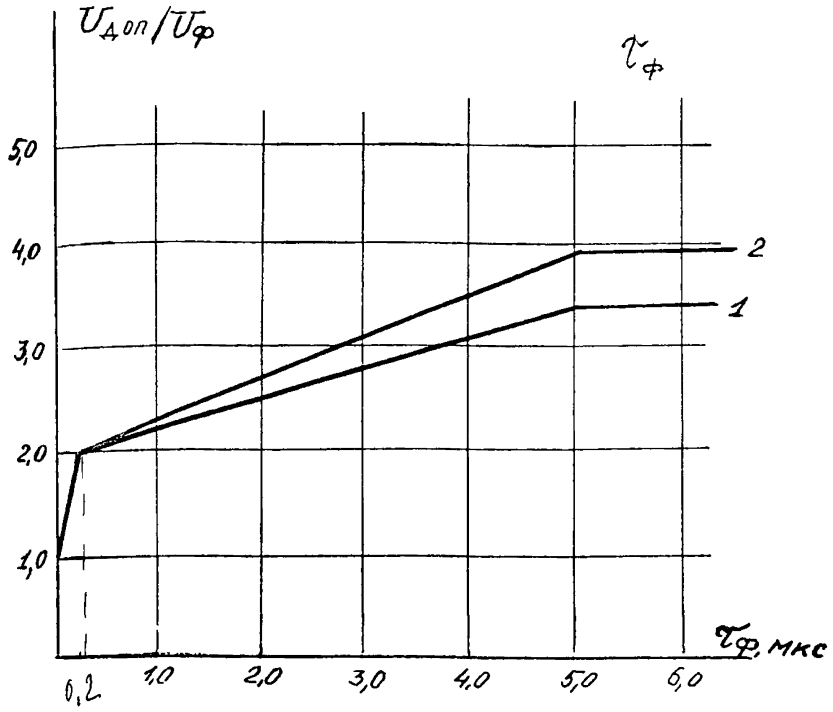


Рис. 4.1.Зависимость выдерживаемых изоляцией электродвигателей 6 кВ импульсных воздействий от длины фронта импульса.
1- для двигателей до 1000 кВт,
2- для двигателей более 1000 кВт.

Методические указания по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6-35 кВ.

Заказ № 12. Дата 10.05.01 г. Формат 60x90 1/16
Объем 4,75 п.л. Тираж 500.
Отпечатано ООО "Сопротэк-11"
123022, г. Москва, ул. Пресненский Вал, д.6, стр. 1

---

gost.e-ecolog.ru