

РУКОВОДСТВО
ПО ЗАЩИТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-1150 кВ
ОТ ГРОЗОВЫХ И ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

УТВЕРЖДЕНО Первым заместителем председателя Правления РАО "ЕЭС России" О.В.Бритвиным 12 июля 1999 года

В "Руководстве" изложены методы расчета внутренних (коммутационных и резонансных) перенапряжений и выбора комплекса мер защиты от них в электрических сетях 110-1150 кВ с эффективно заземленной нейтралью, в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной, компенсированной и резистивно-заземленной нейтралью, в том числе, в системе собственных нужд электрических станций.

Приведены методы расчета грозоупорности и выбора средств ее повышения для воздушных линий электропередачи, РУ и подстанций 6-1150 кВ в зависимости от грозовой активности в регионе и использованных средств их защиты от грозовых перенапряжений.

"Руководство" предназначено для инженеров, работающих в области проектирования и эксплуатации энергосистем, электрических сетей и станций.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первое издание "Руководства по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений" (в дальнейшем - "Руководство") было введено в действие в 1994 г. (РД 34.35.125-93).

По поручению Департамента стратегии развития и научно-технической политики РАО "ЕЭС России" АО НИИПТ и АО ВНИИЭ редакционно переработали, дополнили и подготовили к типографскому изданию вторую редакцию "Руководства". При ее подготовке учтен накопленный опыт защиты от перенапряжений в энергосистемах и научно-технический прогресс в этой области электроэнергетики. В частности, принято во внимание, что в России и других странах прекращен выпуск разрядников, вместо которых с середины 70-х годов производятся более эффективные ограничители перенапряжений разных типов. Добавлена глава о защите подстанций 110-750 кВ с элегазовыми КРУ. Основной текст "Руководства" значительно сокращен, а методические и справочные материалы перенесены в приложения.

"Руководство" состоит из 3-х частей:

Часть 1. Защита от внутренних перенапряжений электрических сетей 110-1150 кВ;

Часть 2. Защита от внутренних перенапряжений электрических сетей 6-36 кВ;

Часть 3. Грозозащита линий и подстанций 6-1150 кВ.

В каждой части "Руководства" содержатся: рекомендации по защите от перенапряжений, приложения с методиками и примерами расчета, справочные материалы, информация об имеющемся программном обеспечении расчетов перенапряжений различных видов.

В подготовке "Руководства" принимали участие АО НИИПТ (головная организация) и АО ВНИИЭ. Кроме них, к разработке отдельных вопросов привлекались: АО ЭНИН, АО "Институт "Севзапэнергопроект", АО ООТ НИИ "Электрокерамика", ЗАО НПО "Электрокерамика", ОАО "Корниловский фарфоровый завод", СПбГТУ и другие организации, что видно по списку составителей "Руководства".

Компьютерный набор "Руководства" подготовлен ЗАО НПО "Электрокерамика", макетирование - Петербургским энергетическим институтом повышения квалификации (ПЭИПК) Минтопэнерго РФ.

Отправной точкой для развития изложенных ниже методов расчета перенапряжений послужили фундаментальные труды проф. Л.И.Сиротинского, проф. А.А.Горева, проф. Н.Н.Щедрина, проф. И.С.Стекольников, проф. Д.В.Разеви́га, проф. А.И.Долгинова, проф. М.Л.Левинштейна, проф. В.В.Бургсдорфа, проф. И.А.Груздева, к.т.н. Д.Е.Артемьева, к.т.н. А.А.Акопяна, к.т.н. А.В.Корсунцева и многих других отечественных ученых и специалистов, а также рекомендации СИГРЭ.

Научное руководство работой по подготовке 2-го издания "Руководства" осуществил академик РАН Н.Н.Тиходеев (АО НИИПТ).

Основными авторами и составителями "Руководства" являются:

по части 1 - проф., д.т.н. С.С.Шур (АО НИИПТ);

по части 2 - к.т.н., зав. сектором перенапряжений АО ВНИИЭ Н.Н.Беляков;

по части 3 - зав. сектором перенапряжений АО НИИПТ А.Н.Новикова.

Кроме них, в подготовке отдельных разделов "Руководства" и приложений к нему принимали участие следующие специалисты:

по внутренним перенапряжениям и защите от них -

инженер В.В.Крыжановский (АО НИИПТ, подраздел 2.9, Приложения 3 и 10);

инженер М.Н.Редругина (АО НИИПТ, Приложения 6 и 8);

к.т.н. А.А.Филиппов (АО НИИПТ, подразделы 3.2, 3.3 и 3.7);

к.т.н. В.И.Гавриков (АО НИИПТ, подразделы 3.3, 3.6 и 3.7);

к.т.н. В.Е.Розет (АООТ НИИ "Электрокерамика", Приложение 4);

к.т.н. Г.М.Иманов (ЗАО НПО "Электрокерамика", Приложение 4);

к.т.н. К.И.Кузьмичева (АО ВНИИЭ, часть 2).

По грозовым перенапряжениям и защите от них -

проф., член-корр. РАН М.В.Костенко (СПбГТУ, разделы 6, 7 и 9, Приложение 17);

проф., д.т.н. Ф.Х.Халилов (СПбГТУ, раздел 9);

к.т.н. А.И.Таджибаев (ПЭИПК, раздел 9);

к.т.н. Н.И.Гумерова (СПбГТУ, раздел 9, Приложения 31 и 33);

к.т.н. С.М.Попов (АО ВНИИЭ, раздел 9, Приложения 31 и 32);

инженер Б.Б.Бочковский (АО ВНИИЭ, разделы 6 и 7, Приложение 22);

д.т.н. Э.М.Базелян (АО ЭНИН, Приложение 29);

к.т.н. М.Л.Фельдман (АО "Институт Севзапэнергопроект", подраздел 8.3, Приложение 28);

инженер М.Б.Кегелес (АО "Институт Севзапэнергопроект", подраздел 8.3, Приложение 30);

д.т.н. Б.В.Ефимов (Кольский НЦ РАН, Приложение 21);

к.т.н. Я.А.Цирель (АО НИИПТ, Приложение 15);

инженер О.В.Шмараго (АО НИИПТ, Приложения 23 и 26);

к.т.н. В.Я.Ерунов и инженер И.П.Полякова (АО НИИПТ, Приложение 34).

С введением в действие "Руководства" утрачивают силу "Руководящие указания по защите электростанций и подстанций 3-500 кВ от прямых ударов молнии и грозовых волн,

набегающих с линий электропередачи" (ОРГРЭС, 1975).

Замечания и предложения по уточнению и совершенствованию "Руководства", а также вопросы по его использованию в практической работе следует направлять в АО НИИПТ (194223, Санкт-Петербург, ул. Курчатова, 1/39, факс: 812+5554931).

ЧАСТЬ 1

ЗАЩИТА ОТ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 110-1150 кВ

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ ЧАСТИ 1

E - амплитуда э.д.с;

N_s - ожидаемое число воздействий внутренних перенапряжений в год;

P - передаваемая по ВЛ мощность;

$P_{\text{нат}}$ - натуральная мощность ВЛ;

$P(X \leftarrow \xi)$ - функция распределения вероятностей случайной величины X ;

$T_{\text{ос}}$ - ресурс пропускной способности ОПН;

$U_{\text{н}}$ - номинальное напряжение;

$U_{\text{м}}$ - наибольшее рабочее напряжение;

\bar{X} - математическое ожидание случайной величины X ;

X - реактивное сопротивление системы;

Z_w - волновое сопротивление линии;

$k_{\text{к.з}}$ - коэффициент несимметрии при однополюсном к.з.;

k - амплитуда (кратность) перенапряжений, возникающих в переходном режиме после аварийной или плановой коммутации;

$k_{\text{ост}}$ - напряжение, остающееся на резисторе ограничителя;

n_s - ожидаемое число коммутаций в год;

U - вынужденная составляющая переходного процесса перенапряжений;

v_e - индекс "е" обозначает ненасыщенное значение вынужденного напряжения;

α - коэффициент затухания собственных колебаний электропередачи;

β_k - частоты собственных колебаний электропередачи;

K - ударный коэффициент перенапряжений;

λ - волновая длина линии;

φ - потокосцепление;

θ - значение угла между векторами э.д.с. E_1 и E_2 электропередачи;

σ_x^2 - дисперсия случайной величины X ;

(0); (1); (2) - индексы, определяющие параметры нулевой, прямой и обратной последовательности;

"п" и "р" - индексы, указывающие соответственно на питающий и разомкнутый концы электропередачи.

РАЗДЕЛ 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 110-1150 кВ

1.1. Введение. Основные определения

В 1 части даются рекомендации по защите от внутренних, резонансных и коммутационных перенапряжений сетей напряжением 110-1150 кВ. Здесь излагаются физическая природа, особенности и требования к защите каждого вида как резонансных, так и коммутационных перенапряжений. К 1 части относятся девять приложений, в которых приводятся методы расчета всех видов внутренних перенапряжений и некоторые справочные материалы. Для удобства расчетов разработаны три пакета программ:

- расчета резонансных перенапряжений (РЕМА-1);
- расчета ожидаемого срока службы ограничителей перенапряжений 110-1150 кВ (РЕМА-2);
- эффективности защиты от грозových, резонансных и низко- и высокочастотных коммутационных перенапряжений (РВПМ-1).

Изложение сопровождается подробными численными примерами, которые иллюстрируют методики и могут быть использованы в качестве тестовых задач.

Электрические сети напряжением 110-1150 кВ работают с эффективно заземленной нейтралью. Под системой с эффективно заземленной нейтралью обычно понимается система, все элементы которой соединены с землей наглухо, либо через индуктивное сопротивление,

величина которого настолько мала, что коэффициент несимметрии $h_{к.з}$ в любой точке электропередачи не превосходит 1,4 для различных схем и режимов работы системы,

возможных в процессе эксплуатации. Под $h_{к.з}$ понимают отношение наивысшего напряжения частоты 50 Гц здоровой фазы в этой точке во время короткого замыкания на землю одной или двух фаз к фазному напряжению рабочей частоты, появляющемуся после устранения повреждения. Эффективное заземление нейтрали сети может быть получено при глухом заземлении нейтралей всех или части силовых трансформаторов системы.

Коэффициент $h_{к.з}$ зависит от соотношения активных и реактивных сопротивлений системы. Требование $h_{к.з} \leq 1,4$ приблизительно соблюдается, когда отношение реактивной

составляющей входного сопротивления системы, рассчитанного относительно места нарушения симметрии по параметрам нулевой последовательности, к реактивной составляющей того же входного сопротивления, рассчитанного по параметрам прямой

последовательности $X_{BX}^{(0)} / X_{BX}^{(1)} \leq 3$, т.е. не больше трех. В то же время отношение активной составляющей этого сопротивления, рассчитанного по параметрам нулевой

последовательности $r_{BX}^{(0)}$, к $r_{BX}^{(1)}$ не больше 1,0, т.е. $r_{BX}^{(0)} / r_{BX}^{(1)} \leq 1,0$. Активные и реактивные составляющие полного входного сопротивления при этом рассчитываются по значениям переходных реактивностей синхронных машин.

В нормальном режиме напряжение на любых элементах электропередачи не должно повышаться сверх наибольшего рабочего, под которым следует понимать длительное напряжение, т.е. без ограничения времени воздействия, безопасное для изоляции. В табл.1.1

приведены наибольшие рабочие напряжения U_m . Повышение напряжения сверх наибольшего рабочего называется перенапряжением. Обычно величина внутренних перенапряжений характеризуется их кратностью k , под которой понимается отношение максимальной амплитуды перенапряжений к амплитуде наибольшего фазного рабочего напряжения.

Таблица 1.1

Наибольшие рабочие напряжения сетей 110-1150 кВ

Класс напряжения сети, кВ	110	220	330	500	750	1150
Наибольшее рабочее напряжение, U_m , кВ	126	252	363	525	787	1200

Выбор изоляции и координация ее с характеристиками защитных средств определяется внутренними перенапряжениями, которые подразделяются на резонансные и коммутационные.

1.2. Резонансные перенапряжения

Резонансные перенапряжения возникают при неблагоприятных сочетаниях как структуры и параметров схемы электропередачи и ее режима, так и структуры и параметров питающей системы. Резонансные перенапряжения могут существовать до тех пор, пока действие различного вида систем релейных защит и автоматики, регуляторов напряжения или вмешательство персонала не приведет к изменению схемы и режима.

В электропередачах, оборудованных выключателями на стороне высокого напряжения, перенапряжения на разомкнутом конце воздействуют как на линейную изоляцию, так и на изоляцию подстанционной аппаратуры (кроме силовых трансформаторов); на изоляцию силовых трансформаторов в этих электропередачах воздействуют перенапряжения, возникающие на питающем конце линии. В таких электропередачах возможны следующие виды резонансных перенапряжений:

- на основной частоте 50 Гц, вынужденное напряжение в симметричном (U) и несимметричном ($U_{к.з}$) режимах (при односторонне питаемой электропередаче);

- в паузе успешного ОАПВ ($U_{\text{ОАПВ}}$);

- при неполнофазных режимах;

- на четных, нечетных и дробных высших гармонических - резонанс на частотах $2k\omega$; (2

$k+1)\omega$ и $(2k+1)\frac{\omega}{3}$; $k=1; 2; 3$.

В электропередачах, где все или часть трансформаторов не имеют выключателей на стороне высокого напряжения, далее называемых "блочные электропередачи", на элементы линейной и подстанционной изоляции, включая изоляцию силовых трансформаторов, могут воздействовать перенапряжения, возникающие на разомкнутом конце. В блочных электропередачах, кроме перечисленных, возможно возникновение особого вида резонансных перенапряжений, далее именуемого "переходный феррорезонанс". В схеме рис.1.1, а переходный феррорезонанс инициируется промежуточными трансформаторами проходных ПС T^1 ;+; T^n ; в схеме рис.1.1, б - автотрансформатором АТ. При этом наличие или отсутствие трансформаторов T^1 ; T^2 ;+; T^n , показанных пунктиром, несущественно. В схеме рис.1.1 переходный феррорезонанс может возникать при подключении к линии холостого трансформатора, показанного на рис.1.1, в.

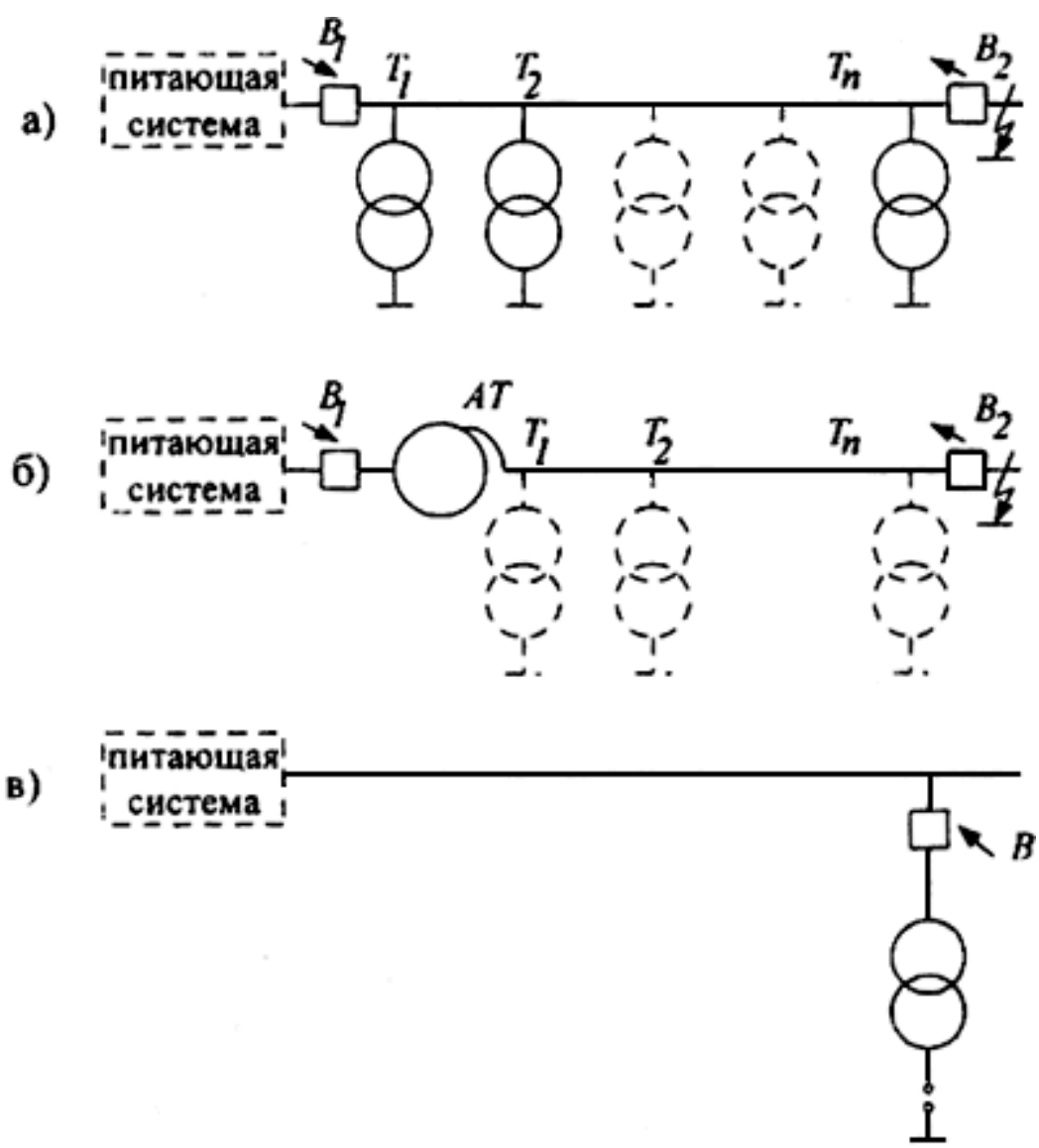


Рис.1.1. Схемы электропередач, подверженных переходному феррорезонансу

В схемах рис.1.1, а и 1.1, б линия может быть секционирована выключателями на участки. Часть участков может быть двухцепными или иметь тупиковые отпайки. При этом обязательным условием для возникновения переходного феррорезонанса является одностороннее питание схемы. Такое условие может иметь место в послеаварийных или ремонтных режимах, а также при ТАПВ головного участка секционированной радиальной передачи, если этот участок одноцепный.

Защита от резонансных перенапряжений необходима, если их число, длительность и величина превосходят значения, указанные в табл.1.2-1.4, в которых приведены допустимые повышения напряжения промышленной частоты в зависимости от числа и длительности их воздействия на оборудование 110-1150 кВ.

Таблица 1.2

Допустимое повышение напряжения промышленной частоты на оборудовании 110-330 кВ

Оборудование	Допустимое повышение напряжения
--------------	---------------------------------

Все оборудование, кроме защитных аппаратов	1,1	1,3	1,35	-	-	-	1,8
Ограничители перенапряжений с уровнем ограничения 1,7	1,1	1,2	-	1,3	1,35	1,4	-

Пояснения к табл.1.2-1.4.

В числителе дроби табл.1.2 указаны значения для изоляции фаза-земля в долях амплитуды наибольшего рабочего фазного напряжения, в знаменателе - для изоляции фаза-фаза в долях амплитуды наибольшего рабочего линейного напряжения. Значения напряжения для изоляции фаза-фаза относятся к трехфазным силовым трансформаторам, электромагнитным трансформаторам напряжения, а также к аппаратам в трехполюсном исполнении при расположении трех полюсов в одном баке или на одном магнитопроводе. При этом значения допустимого повышения напряжения 1,6; 1,7 и 1,8 относятся только к внешней междуфазной изоляции аппаратов 110 кВ и 220 кВ.

Если повышение напряжения длительностью 20 мин имело место 2 раза с часовым интервалом, то в течение ближайших 24 часов повышение напряжения в третий раз допускается лишь в случае, если это требуется ввиду аварийной ситуации, но не ранее, чем через 4 часа.

Указанные в табл.1.2-1.4 относительные значения напряжения распространяются также на повышение напряжения, отличающегося от синусоиды частотой 50 Гц за счет наложения гармонических составляющих. Указанные в таблицах значения фазных и междуфазных напряжений представляют собой отношение максимума повышенного напряжения к амплитуде наибольшего рабочего фазного или междуфазного напряжения соответственно.

1.3. Коммутационные перенапряжения

После любой коммутации, как плановой, так и аварийной, возникают коммутационные перенапряжения. Коммутационные перенапряжения образуются при резком изменении структуры и параметров сети из-за заряда и перезаряда ее емкостей в процессе перехода системы от одного состояния к другому.

Наиболее важные виды коммутационных перенапряжений возникают при:

- плановых включениях и отключениях ненагруженных линий, ненагруженных трансформаторов и автотрансформаторов и компенсационных реакторов;
- аварийных разрывах электропередачи в процессе ликвидации короткого замыкания или асинхронного хода;
- работе АВР;
- включении или отключении разъединителями участков холостых шин ОРУ, ЗРУ, КРУЭ.

Если коммутация осуществляется выключателями, то в зависимости от вида возникающих перенапряжений, систем релейной защиты и автоматики, а также схемы и параметров элементов передачи, длительность воздействующих на изоляцию коммутационных перенапряжений может находиться в интервале от нескольких десятков миллисекунд до нескольких секунд. При коммутации разъединителями участков холостых шин ОРУ или ЗРУ фронт перенапряжений находится в интервале от 10 мкс до 500 мкс. При коммутации элегазовым разъединителем участков холостых шин элегазовых КРУ (КРУЭ) фронт возникающих высокочастотных коммутационных перенапряжений находится в интервале от 5 нс до 20 нс.

Большинство аварийных коммутаций обычно сопровождается целой серией разного вида коммутационных перенапряжений. Число и длительность каждого вида перенапряжений из этой серии определяется видом коммутации, параметрами коммутируемого участка сети и системой защит и автоматики. При наличии высокочастотных защит длительность режима к.з. составляет $t_{к.з} = 0,8-0,15$ с, причем выключатели по обеим сторонам аварийного участка линии работают с разбросом около $0,02-0,06$ с. Если авария отключается дистанционными защитами, то время от момента возникновения к.з. до отключения выключателя одного из концов аварийного участка линии составляет $t_{к.з} = 0,1-0,15$ с; второй выключатель аварийного участка отключается со временем $t_{к.з} = 0,3-0,6$ с.

При трехфазном быстродействующем АПВ (БАПВ) длительность бестоковой паузы составляет $t_{АПВ} = 0,3-0,4$ с. При обычном трехфазном АПВ (ТАПВ) длительность паузы обычно находится в пределах $0,6-1,5$ с, причем с ростом номинального напряжения электропередачи пауза уменьшается. При однофазном АПВ (ОАПВ) длительность бестоковой паузы обычно колеблется в пределах $t_{ОАПВ} = 0,8-3,5$ с.

Режим после повторного включения продолжается от момента повторного включения линии с одной стороны до момента полного смыкания электропередачи. При успешном ТАПВ без улавливания синхронизма и ОАПВ этот режим имеет длительность $0,2-0,3$ с. При использовании ТАПВ с улавливанием синхронизма этот режим в среднем длится несколько секунд. При неуспешном БАПВ или ТАПВ линия аварийно отключается без выдержки времени выключателем, производившим повторное включение. Этот этап длится $t_{к.з} = 0,08-0,15$ с. При неуспешном ОАПВ аварийная линия отключается без выдержки времени с двух сторон, вслед за неуспешным ОАПВ следует цикл ТАПВ.

1.4. Статистическая природа резонансных и коммутационных перенапряжений

При повторении в одной и той же системе коммутации одного и того же вида (например, плановое включение ненагруженной линии, аварийное отключение к.з. и т.п.) кратности возникающих при этом коммутационных и резонансных перенапряжений меняются в широких пределах. Статистика внутренних перенапряжений объясняется влиянием ряда факторов, количественные характеристики которых подвержены случайным изменениям.

Первая группа случайных факторов связана в основном с конструкцией, индивидуальными характеристиками, качеством и регулировкой выключателей и их управления, а в некоторых случаях также с метеорологическими ситуациями на линии. Эти факторы оказывают влияние на интенсивность переходных процессов после коммутации, так как приводят к случайным изменениям фазовых углов э.д.с. при включении отдельных фаз электропередачи и одновременности действия приводов отдельных фаз выключателей, а также к случайным колебаниям величины напряжения, которое остается на неповрежденных фазах к моменту автоматического повторного включения, т.е. по окончании бестоковой паузы $t_{АПВ}$ или $t_{ОАПВ}$ и т.п.

Вторая группа случайных факторов связана со схемой и режимом системы. Сюда относятся, например, коммутации и переключения в различных точках питающей системы, включения и отключения компенсационных реакторов и колебания э.д.с. как в результате ведения графика электропередачи, так и действия автоматических устройств регулирования возбуждения, плановых и аварийных ремонтов, случайности местоположения точки к.з. на линии и т.п.

В табл.1.5 приведены усредненные значения пределов случайных изменений э.д.с. для электропередач, питающихся от шин станции, на генераторах которых имеется автоматическое регулирование возбуждения.

Таблица 1.5

**Усредненные оценки пределов случайных изменений и среднего значения э.д.с.
(по данным проф. И.А.Груздева)**

Вид коммутации	Системы возбуждения с неуправляемыми полупроводниковыми выпрямителями* и электронная система возбуждения			Быстродействующие системы возбуждения с кратностью форсирования 2-4**		
	E_{\min}	E_{\max}	\bar{E}	E_{\min}	E_{\max}	\bar{E}
Разрыв передачи вследствие отключения к.з.	1,0	1,2	1,1	1,05	1,25	1,15
ТАПВ, БАПВ успешное или неуспешное	1,0	1,15	1,075	1,0	1,1	1,05
Разрыв передачи вследствие качаний или асинхронного хода	1,0	1,25	1,125	1,0	1,3	1,15

Примечания.

* Высокочастотная система возбуждения; бесщеточная система возбуждения; статическая полупроводниковая система возбуждения.

** Ионные и тиристорные системы самовозбуждения или независимого возбуждения; система возбуждения с параллельно включенными полупроводниковыми выпрямителями.

В течение года статистические распределения резонансных перенапряжений определяются в основном случайными факторами второй группы; распределения коммутационных перенапряжений - факторами как первой, так и второй групп.

**1.5. Учет статистических распределений внутренних перенапряжений
при защите изоляции сетей напряжением 110-1150 кВ**

Учитывая статистический характер внутренних перенапряжений, при координации изоляции линий и подстанций и выборе комплекса защитных средств необходимо учитывать влияние всех возможных в данной электропередаче видов перенапряжений. При этом воздействующие перенапряжения должны характеризоваться как вероятностью, с которой кратность того или иного вида перенапряжений может быть превзойдена в одной коммутации данного вида, так и ожидаемым числом таких коммутаций в течение года.

Результаты расчетов статистических распределений как надежности и эффективности комплекса систем защиты, так и ожидаемой вероятности перекрытия (пробоя) изоляции,

носят приближенный характер, поэтому расчеты должны обеспечить либо незаниженные оценки этих величин на заданном уровне доверительной вероятности, либо оценки усеченного сверху предела их разброса.

Формулы и исходные данные, необходимые для усредненной оценки ожидаемого в течение года числа амплитуд коммутационных перенапряжений, воздействующих на изоляцию линий электропередачи, элементы изоляции подстанций и расчета токовых нагрузок на резисторы ограничителей перенапряжений, приведены в Приложении 1.

Формулы и исходные данные, необходимые для незаниженной оценки надежности работы, т.е. ожидаемого на заданном уровне доверительной вероятности срока безаварийной службы ограничителей перенапряжений (ОПН), являющихся основным элементом любого комплекса защитных мер, приведены в Приложении 6.

РАЗДЕЛ 2. РЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

2.1. Исходные положения

Резонансные перенапряжения возникают только в односторонне питаемых электропередачах. Исключение составляет успешное ОАПВ, которое существует от момента окончания паузы успешного ОАПВ до момента замыкания второго из выключателей "больной" фазы, т.е. до включения передачи в транзит.

Резонансные перенапряжения должны рассчитываться с учетом диапазона случайных годовых колебаний реактивного сопротивления питающей системы и нелинейности характеристик намагничивания силовых трансформаторов (автотрансформаторов) и компенсирующих реакторов.

Все виды резонансных перенапряжений чувствительны к активным потерям, короне на проводах, нагрузкам и т.д. Так, например, величина вынужденной составляющей переходного процесса перенапряжений частоты 50 Гц слабо зависит от активных потерь, которые оказывают существенное влияние на условия возникновения перенапряжений при делении частоты в продольно- и поперечнокомпенсированных электропередачах.

Необходимо рассмотреть следующие виды резонансных перенапряжений:

- вынужденное напряжение переходного процесса перенапряжений на частоте 50 Гц в симметричном и несимметричном (при ОАПВ и однополюсном к.з.) режимах;
- вынужденное напряжение на частоте 50 Гц в паузе успешного ОАПВ;
- перенапряжения на частоте 50 Гц в неполнофазных режимах;
- перенапряжения при делении частоты в продольно и поперечно компенсированных электропередачах;
- перенапряжения на четных, частоты $2k\omega$ и нечетных, частоты $(2k+1)\omega$ ультрагармониках при явлениях переходного феррорезонанса;
- феррорезонансные перенапряжения на частоте 50 Гц в электропередачах 220-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения;
- параметрическое самовозбуждение генераторов, работающих на ненагруженную линию;
- автопараметрическое самовозбуждение ультрагармоник четной кратности.

Статистические характеристики распределения амплитуд резонансных перенапряжений всегда в той или иной мере приближены. Это вынуждает искать либо незаниженные оценки вероятности того, что амплитуда резонансных перенапряжений не превзойдет их максимального за год значения, либо ориентироваться на ожидаемый на заданном уровне

доверительной вероятности верхний предел разброса амплитуд.

В отличие от коммутационных и грозовых перенапряжений, защита от которых состоит в ограничении их амплитуды, защита от резонансных перенапряжений должна быть направлена на то, чтобы полностью исключить возможность возникновения резонансных явлений, либо, если это оказывается экономически нецелесообразно, создать такие условия, при которых величина и длительность сопутствующих перенапряжений становятся безопасными для оборудования. Методы расчета резонансных перенапряжений и защита от них изложены в Приложении 2.

2.2. Параметры схем замещения и количественные оценки основных факторов, влияющих на резонансные перенапряжения

2.2.1. Характеристики намагничивания силовых трансформаторов (автотрансформаторов) и стальных сердечников компенсационных реакторов.

Кривую намагничивания шунта намагничивания Т- или Г-схемы замещения как силового трансформатора, так и стальных сердечников компенсационных реакторов, следует аппроксимировать полиномом с положительными коэффициентами, содержащим только нечетные степени потокосцепления, согласно измерениям в действующих энергосистемах, для силовых трансформаторов (автотрансформаторов) это выражение имеет следующий вид:

$$i_{\mu} = \sum_{k=0}^n a_k \varphi^{2k+1} \quad (2.1a)$$

Здесь φ - мгновенное значение потокосцепления, i_{μ} - мгновенное значение тока намагничивания, соответствующее этому потокосцеплению;

$$\sum_{k=0}^n a_k = 1 \quad (2.16)$$

В относительных единицах все многообразие характеристик сводится к двум, которые условно можно назвать "типовыми": характеристика 1 (силовые трансформаторы)

$$i_{\mu} = 0,15\varphi + 0,18\varphi^9 + 0,68\varphi^{11} \quad (2.2a)$$

и характеристика 2 (автотрансформаторы)

$$i_{\mu} = 0,7\varphi + 0,3\varphi^{13} \quad (2.26)$$

В качестве базисных единиц в формулах (2.2a) и (2.26) приняты $U_{\text{баз}} = U_{\text{н}} \sqrt{2/3}$, кВ; $\omega_{\text{баз}} = 314$, 1/с и, если $I_{\text{н}}$ - паспортное значение тока холостого хода трансформатора (автотрансформатора, в том числе с регулированием в нейтрали), то для характеристики 1 - $I_{\text{баз}} = 2,05 I_{\text{н}}$, а для характеристики 2 - $I_{\text{баз}} = 1,65 I_{\text{н}}$.

Отсюда следует для характеристики 1:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{баз}} &= \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} \frac{\sqrt{2}}{2,05\sqrt{3}}, \text{ КОМ,} \\ \text{для характеристики 2 :} \\ Z_{\text{баз}} &= \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} \frac{\sqrt{2}}{1,65\sqrt{3}}, \text{ КОМ.} \end{aligned} \right\} \quad (2.2\text{в})$$

Расчетные величины схемы замещения трансформатора (автотрансформатора) находят следующим образом. По паспортным значениям $e_{\text{к(В-С)}}$, $e_{\text{к(В-Н)}}$, $e_{\text{к(С-Н)}}$ (в %) определяют реактивности рассеяния между обмотками соответственно высокого-среднего, высокого-низкого и среднего-низкого напряжений $X_{\text{В-С}}$, $X_{\text{В-Н}}$, $X_{\text{С-Н}}$. Паспортные значения $e_{\text{к}}$ зависят от наличия регулирования в нейтрали, мощности АТ и коэффициентов трансформации $U_{\text{В}}/U_{\text{С}}/U_{\text{Н}}$. Реактивности рассеяния находят по формулам:

$$X_{\text{В-С}} = \frac{e_{\text{к(В-С)}}}{100} \frac{U_{\text{н}}^2}{P_{\text{н}}}, \quad X_{\text{В-Н}} = \frac{e_{\text{к(В-Н)}}}{100} \frac{U_{\text{н}}^2}{P_{\text{н}}}, \quad X_{\text{С-Н}} = \frac{e_{\text{к(С-Н)}}}{100} \frac{U_{\text{н}}^2}{P_{\text{н}}}, \text{ Ом;} \quad (2.2\text{г})$$

для трансформатора (автотрансформатора), номинальные напряжения и трехфазная мощность которого $U_{\text{н}}$, (в В) и $P_{\text{н}}$, (в ВА).

Параметры $X_{\text{В}}$, $X_{\text{С}}$, $X_{\text{Н}}$ трехлучевой эквивалентной схемы замещения такого трансформатора (автотрансформатора) рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} 2X_{\text{В}} &= X_{\text{В-Н}} + X_{\text{В-С}} - X_{\text{С-Н}}, \quad 2X_{\text{С}} = X_{\text{В-С}} + X_{\text{С-Н}} - X_{\text{В-Н}} \\ & ; \\ 2X_{\text{Н}} &= X_{\text{С-Н}} + X_{\text{В-Н}} - X_{\text{В-С}}. \end{aligned} \quad (2.2\text{д})$$

Характеристика намагничивания стальных сердечников компенсационных реакторов в относительных единицах ($U_{\text{баз}} = U_{\text{н}} \sqrt{2/3}$, кВ; $I_{\text{баз}} = I_{\text{н}} \sqrt{2}$, А; $\omega_{\text{баз}} = 314$, 1/с) хорошо аппроксимируется следующим двучленом третьей степени:

$$i = p\varphi + q\varphi^3 = p(1 + s\varphi^2). \quad (2.3\text{а})$$

Параметры компенсационных реакторов приведены в табл.2.1.

Таблица 2.1

Характеристика компенсационных реакторов типа РОДЦ

U_H , кВ	P_Φ , МВ·А	I_H , А	$L_{обм}$, Гн	$R_{обм}$, Ом	p	q
500	60	198	4,88	6,0	0,872	0,128
750	110	242	6,0	6,0	0,903	0,097
1150	300	432	5,1	5,3	0,908	0,092

2.2.2. Дополнительный учет коронного разряда при вычислении параметров схем замещения воздушной линии.

На погонные электрические параметры линии, в особенности напряжением 500-1150 кВ, оказывает влияние коронный разряд на проводах. Обычно корона учитывается распределенными активной проводимостью g_k и дополнительной емкостью фазы на землю ΔC_k :

$$g_k = \left(\frac{f}{50}\right)^{0,62} \left[1 - e^{-3,05(\bar{v}/U_0 - 1)}\right] \cdot 10^{-6}, \text{ 1/Ом}\cdot\text{км}; \quad (2.4a)$$

$$\Delta C_k = 2,4 \left(\frac{50}{f}\right)^{0,42} [\bar{v}/U_0 - 1], \text{ пФ/м}. \quad (2.4б)$$

В последних формулах \bar{v} - усредненное вдоль линии значение вынужденного напряжения, рассчитанного с учетом насыщения магнитопроводов. Значение \bar{v} определяется по формуле:

$$\bar{v} = E \frac{(\pi - 2) \cos \lambda^{(1)} + 2 \cos \varphi}{\pi \cos(\lambda^{(1)} + \varphi)}; \quad \varphi = \arctg \left(\frac{X_1}{Z_w}\right). \quad (2.4в)$$

Определенные по параметрам прямой последовательности численные значения X_1 ; Z_w и $\lambda^{(1)}$ указаны на рис.П2.1 и в табл.П2.2 Приложения 2; E - в табл.1.5 Раздела 1.

Входящие в эмпирические формулы (2.4а) и (2.4б) величины зависят от конструкции ВЛ и начального напряжения общей короны при хорошей погоде U_0 . В табл.2.2 указаны численные значения напряжения начала общей короны U_0 для некоторых наиболее распространенных ВЛ.

Таблица 2.2

Начальные напряжения общей короны при хорошей погоде

$U_{н}$, кВ	Конструкция фазы	Междуфазовое расстояние, м	U_0, U_{ϕ}
500	3AC-500	10,5	1,32
	3AC-330	11,7	1,11
	3AC-300	11,7	1,08
750	5AC-400/51	18,0	1,17
	5AC-300	13,5	1,09
	5AC-240	19,5	1,11
	4AC-600	17,5	1,11
	4AC-500	19,5	1,06
	4AC-400	19,5	1,08
1150	8AC-330	24,5	1,1
	6AC-800	22,0	1,2

2.3. Вынужденное напряжение переходного процесса перенапряжений частоты 50 Гц в симметричном режиме

Вынужденное напряжение переходного процесса перенапряжений - это напряжение рабочей частоты, которое устанавливается после затухания электромагнитных переходных процессов, вызванных какой-либо плановой или аварийной коммутацией, обычно через 0,03-0,06 с после коммутации. Величина вынужденного напряжения зависит как от схемы электропередачи (длина и конструкция фазы линии, мощность питающей системы, наличие, число и местоположение шунтирующих реакторов), так и от нелинейных характеристик контуров намагничивания силовых трансформаторов (автотрансформаторов) питающей системы и промежуточных подстанций. Учет этих нелинейностей обязателен. Нелинейные характеристики ограничителей перенапряжений и корона на проводах влияют слабо и их учет не требуется.

В симметричном режиме, который имеет место в результате плановых коммутаций включения линии, сброса нагрузки и аварийных - успешного ТАПВ, отключения внешнего короткого замыкания и разрыва передачи при асинхронном ходе, вынужденное напряжение

U случайно меняется от минимального за год значения U_1 до максимального U_2 . Случайный характер вынужденного напряжения определяется причинами, указанными в пункте 1.4 Раздела 1. Методы расчета математического ожидания, дисперсии и статистического распределения случайной величины U изложены в Приложении 2.

2.4. Вынужденное напряжение частоты 50 Гц в несимметричном режиме

при однополюсном к.з.

В несимметричном режиме, который имеет место в результате аварийных коммутаций разрыва передачи вследствие ликвидации несимметричного к.з., возникшего в результате неуспешного ТАПВ или вследствие ошибок оперативного персонала, вынужденное

напряжение вычисляется через коэффициент несимметрии $k_{кз}$ так:

$$U_{кз} = U k_{кз} \quad (2.5)$$

Оно может изменяться от минимального за год значения $U_{1к}$ до максимального $U_{2к}$.

Статистический характер вынужденного напряжения $U_{кз}$ определяется как факторами, приводящими к случайным изменениям U , так и случайным местоположением вдоль линии точки короткого замыкания. Методы расчета математического ожидания, дисперсии и статистического распределения случайной величины $U_{кз}$ изложены в Приложении 2.

2.5. Вынужденное напряжение частоты 50 Гц в несимметричном режиме

при успешном ОАПВ

Цикл успешного ОАПВ состоит из трех последовательных коммутаций:

однополюсное короткое замыкание одной из фаз, заканчивающееся двусторонним отключением аварийной фазы; автоматическое повторное включение аварийной фазы после бестоковой паузы длительностью $t_{\text{ОАПВ}}$ одним из двух линейных выключателей; полное замыкание бывшей "больной" фазы вторым выключателем.

Вынужденное напряжение частоты 50 Гц $U_{\text{ОАПВ}}$ - это напряжение, устанавливающееся в промежутке времени между окончанием бестоковой паузы успешного ОАПВ и моментом замыкания фазы в транзит ее вторым линейным выключателем. Математическое ожидание, дисперсия и функция статистического распределения случайной величины $U_{\text{ОАПВ}}$ определяются теми же факторами, что и распределения симметричного вынужденного напряжения U , но учет влияния нелинейности характеристик намагничивания силовых трансформаторов (автотрансформаторов) на величину $U_{\text{ОАПВ}}$ не требуется. Методы расчета математического ожидания и статистических распределений случайной величины $U_{\text{ОАПВ}}$ изложены в Приложении 2.

2.6. Защита от перенапряжений в паузе успешного ОАПВ

на электропередачах 500 кВ, 750 кВ, 1150 кВ

В течение паузы успешного ОАПВ на отключенной фазе (см. рис.2.1а) после погасания дуги тока подпитки к.з. на отключенной фазе восстанавливается напряжение U_B , частота которого близка к 50 Гц. Восстанавливающееся напряжение имеет резонансный характер.

Амплитуда U_B зависит от длины и конструкции ВЛ, числа компенсационных реакторов и отношения U_0 / U_ϕ , так как из-за демпфирующего действия короны амплитуда U_B

практически не зависит от номинального напряжения электропередачи.

Защита от перенапряжений в паузе успешного ОАПВ необходима, если на рассматриваемой электропередаче восстанавливающиеся напряжения U_B превышают $U_{доп}$, указанные в таблицах Приложения 4 для ОПН-500 УХЛ или ОПН-750 УХЛ или ОПН других типов для времени $t_{ОАПВ}$ (см. данные табл.2.2 и рис.2.1). Эффективна любая из двух следующих мер защиты:

- отключение на время паузы ОАПВ хотя бы одного из компенсационных реакторов L_P приводит к расстройству резонанса и уменьшению вследствие этого U_B до значений (1,0-1,1) U_Φ , как это видно из кривых (рис.2.1, в) и (рис.2.1, г);

- использование схемы четырехлучевого реактора, когда звезда компенсационных реакторов L_P заземляется через нулевой реактор L_0 . При этом перенапряжения, восстанавливающиеся на отключенной фазе в паузе успешного ОАПВ, характеризуются величиной $U_B \approx U_\Phi$.

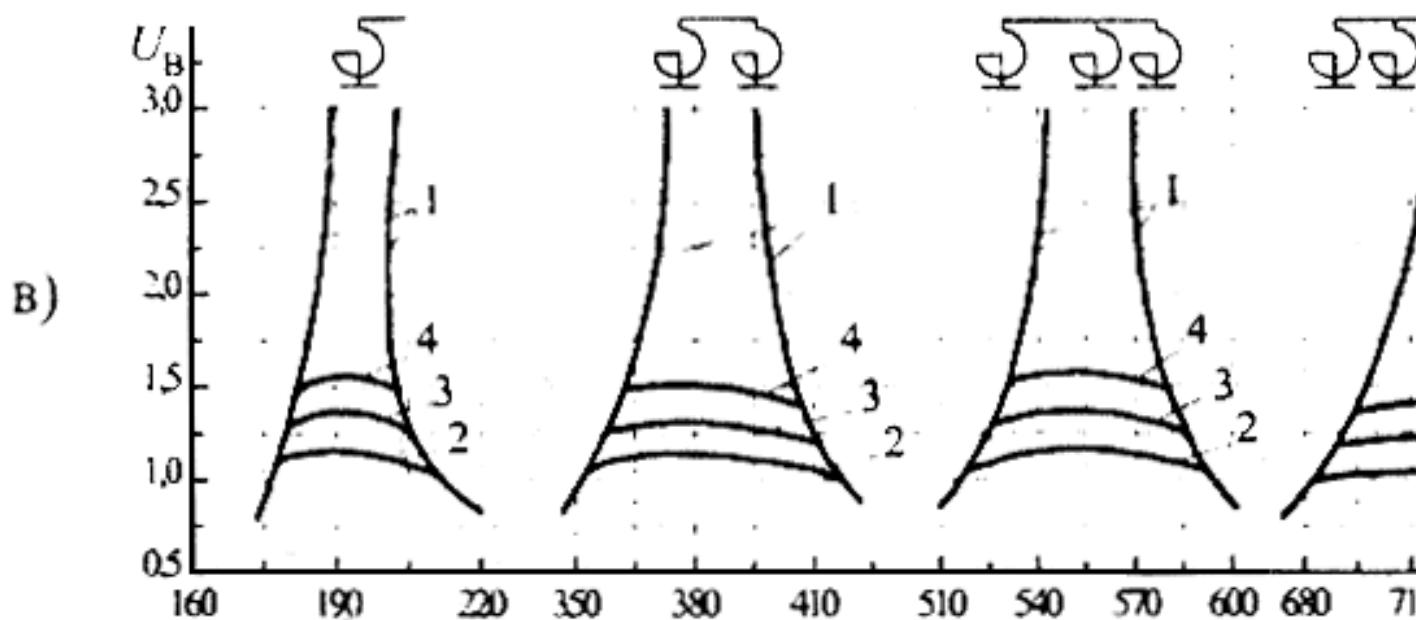
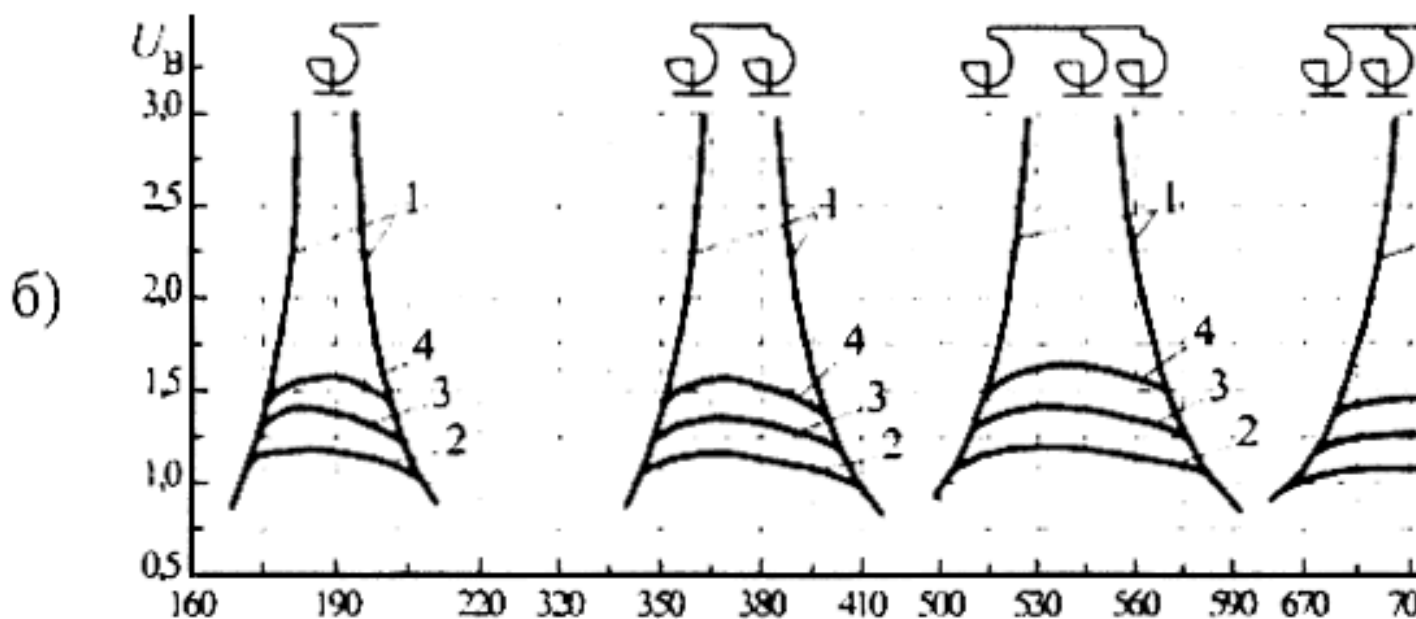
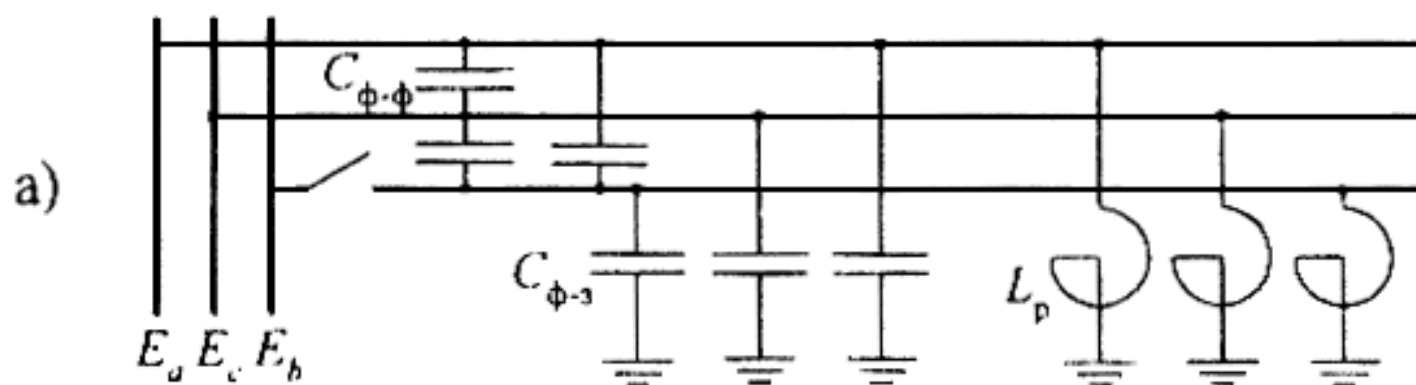


Рис.2.1. Напряжение, восстанавливающееся в паузе ОАПВ на отключенной фазе в зависимости от длины линии, числа компенсационных реакторов и конструкции фазы

Напряжение начала общей короны:

1 - без учета короны;

$$2 - U_0 = 1,0 U_{\Phi};$$

$$3 - U_0 = 1,2 U_{\Phi};$$

$$4 - U_0 = 1,4 U_{\Phi}.$$

Конструкция фазы:

а) Расчетная схема замещения;

б) ВЛ 500 кВ 3хАС-330; $D_{\Phi-\Phi} = 12,8$ м;

в) ВЛ 500 кВ 3хАСО-500; $D_{\Phi-\Phi} = 10,5$ м;

г) ВЛ 750 кВ 4хАСУ-400; $D_{\Phi-\Phi} = 19,5$ м

2.7. Перенапряжения на частоте 50 Гц в неполнофазных режимах

Неполнофазные режимы наблюдаются при отказе во включении или отключении одной или двух фаз коммутирующего выключателя. Однако, опыт эксплуатации свидетельствует, что вероятность одновременного отказа двух фаз крайне мала и такой режим можно не учитывать.

Возникновение перенапряжений неполнофазного режима при двустороннем питании электропередачи принципиально невозможно.

Перенапряжения на частоте 50 Гц могут возникать только при условии, что одностороннее питание коммутируемой электропередачи осуществляется по блочной или полублочной схеме через трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор), одна из обмоток которого замкнута в треугольник. Такие схемы могут иметь место как в показанных на рис.1.2 блочных передачах, так и в электропередачах с выключателями на стороне высшего напряжения ВЛ в режимах планового включения или отключения ненагруженной линии (см., например, схему N 3 в табл.П2.4 Приложения 2).

Перенапряжения на частоте 50 Гц в неполнофазных режимах имеют резонансный характер. Их величина, хотя и ограничивается активными потерями (корона, потери в проводах и др.) и насыщением стальных сердечников трансформаторов (автотрансформаторов), но, как показывает опыт эксплуатации, в областях соотношений параметров элементов электропередачи, близких к точке резонанса, может достигать значения $(1,8-2,1) U_{\Phi}$.

Методы расчета условий возникновения в неполнофазных режимах перенапряжений на частоте 50 Гц, оценка их величины и рекомендации по защите от этих перенапряжений изложены в Приложении 2.

2.8. Параметрическое самовозбуждение генераторов, работающих на ненагруженную линию

Параметрическое самовозбуждение генераторов, работающих на разомкнутую на конце

линию электропередачи, в эксплуатационных условиях недопустимо. Упрощенные оценки границ областей параметров, внутри которых возможно самовозбуждение, с достаточной для практики точностью выполняются с помощью построения, показанного на рис.2.2. По обеим осям координат выбираются одинаковые масштабы.

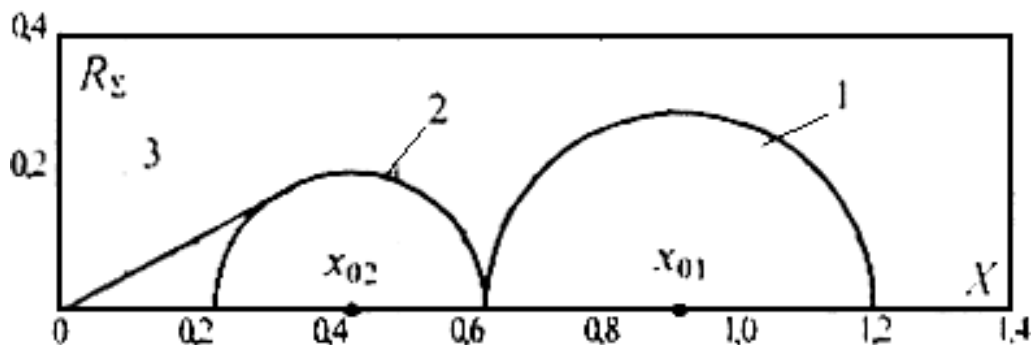


Рис.2.2. Области параметрического самовозбуждения генераторов, работающих на ненагруженную воздушную линию электропередачи

Расчеты удобно вести в относительных единицах, приняв за базисную величину волновое сопротивление воздушной линии Z_w , значения которого указаны в табл.П2.2 Приложения 2. На оси ординат отмечаются две точки:

$$X_{01} = X_T + 0,5(X_d + X_q),$$

$$X_{02} = X_T + 0,5(X'_d + X_q),$$

где X_T - реактивность рассеивания обмоток всех параллельно и последовательно соединенных трансформаторов, включенных между генераторами и воздушной линией; X_d , X'_d и X_q - соответствующие параметры всех параллельно включенных генераторов, питающих электропередачу, причем X_T , X_d , X'_d и X_q определяются по параметрам прямой последовательности.

Из точки X_{01} радиусом $0,5(X_d - X_q)$ проводится полуокружность, которая ограничивает первую область самовозбуждения. Из точки X_{02} радиусом $0,5(X_q - X'_d)$ проводится полуокружность, которая ограничивает вторую область самовозбуждения. Из начала координат ко второй (левой) полуокружности проводится касательная, которая ограничивает третью область самовозбуждения.

Для турбогенераторов, у которых $X_d = X_q$, не существует первой области самовозбуждения, для генераторов без демпферных обмоток не существует третьей области.

Для того, чтобы исключить самовозбуждение генераторов, точка с координатами X_Σ и R_Σ должна оказаться вне областей самовозбуждения.

Координаты X_Σ и R_Σ определяются по следующим формулам.

Для схемы рис.П2.1, а (см. Приложение 2):

$$X_{\Sigma} = Z_w \frac{\cos(\lambda^{(1)} - \varphi)}{\cos \varphi \sin \lambda^{(1)}}; \varphi = \arctg(X_1 / Z_w). \quad (2.8)$$

Для схемы рис.П2.1, б (см. Приложение 2):

$$X_{\Sigma} = \frac{Z_w (X_1 + X_P)(X_{P1} + X_{P2}) \cos \lambda^{(1)} + [Z_w^2 (X_1 + X_{P1}) - X_{P1} X_1 X_{P2}] \sin \lambda^{(1)}}{(X_{P1} X_{P2} - Z_w^2) \sin \lambda^{(1)} - Z_w (X_P + X_{P2}) \cos \lambda^{(1)}};$$

$$X_P = \frac{X_{P1} X_{P2}}{X_{P1} + X_{P2}}. \quad (2.9)$$

Величину R_{Σ} для обеих схем находят по формуле:

$$R_{\Sigma} = R + R_T + R_{\Gamma}. \quad (2.10)$$

В формулах (2.8), (2.9), (2.10) можно принять $R = R_{\Pi} l$, где l - длина линии, км; R_{Π} - активное сопротивление линии, Ом/км; Z_w - волновое сопротивление линии, Ом; величина $\lambda^{(1)}$ указана в табл.П2.2 Приложения 2; R_{Γ} и R_T - соответственно, активные сопротивления питающих генераторов и трансформаторов. Этими формулами определяется минимальное допустимое по условиям самовозбуждения число генераторов и трансформаторов, от которых может питаться ненагруженная воздушная линия, так как с увеличением числа генераторов и трансформаторов уменьшаются радиусы окружностей, ограничивающих области самовозбуждения, а центры окружностей приближаются к началу координат.

2.9. Перенапряжения на четных, частоты $2^k \omega$, и нечетных, частоты $(2^k + 1) \omega$, ультрагармониках при явлениях переходного феррорезонанса

Переходный феррорезонанс возможен только в односторонне питаемых блочных или полублочных передачах, где ВЛ коммутируется вместе с невозбужденным или недовозбужденным при разрыве передачи вследствие отключения внешнего к.з. силовым трансформатором (см. рис.1.2). Такие коммутации имеют место при плановом включении, ТАПВ, отключении внешнего к.з., а также при подключении к линии невозбужденного трансформатора.

Физическая природа этого вида перенапряжений следующая. В любой из перечисленных коммутаций в магнитной цепи трансформатора начинается переходной процесс установления нового режима. Исходное состояние магнитной цепи скачком измениться не может, поэтому в

потокосцеплении, кроме основной гармоники $\Psi_1(t) \cos \omega t$, должна появиться свободная затухающая аperiодическая составляющая $\Psi_0(t)$, такая, чтобы в момент $t=0$ удовлетворялись следующие начальные условия:

$$\Psi_0 = [\Psi_1(t)\cos\omega t + \Psi_0(t)]|_{t=0} = \Psi_1(0) + \Psi_0(0)$$

Наличие в потокосцеплении аperiodической составляющей приводит к появлению в токе намагничивания, кроме основной как нечетных, так и четных составляющих, которые будут существовать, пока аperiodическая составляющая не затухнет. Например, для кубической характеристики намагничивания

$$i_{\text{НАМ}} = \Psi^3 = [\Psi_1(t)\cos\omega t + \Psi_0(t)]^3$$

получим:

$$i_{\text{НАМ}} = \Psi_0^3 + 1,5\Psi_0\Psi_1^2 + 1,5\Psi_0^3\cos 2\omega t + \Psi_1(3\Psi_0^2 + 0,75\Psi_1^2)\cos\omega t + 0,75\Psi_1^3\cos$$

Гармонические составляющие тока намагничивания вызывают на элементах цепи падения напряжения, что по своему действию эквивалентно введению в систему продольных э.д.с. соответствующей частоты, поэтому, если одна или несколько частот свободных колебаний электропередачи, коммутируемой в блоке с невозбужденным трансформатором, близка к частоте какой-либо гармонической в токе намагничивания, возникнут резонансные повышения напряжения соответствующей частоты. Эти перенапряжения будут существовать до тех пор, пока не завершится переходный процесс установления нового режима магнитной цепи или, что то же самое, пока не затухнет аperiodическая составляющая потокосцепления. Перенапряжения, возникающие при явлениях переходного феррорезонанса, иллюстрируют осциллограммы, показанные на рис.2.3, а и 2.3, б.

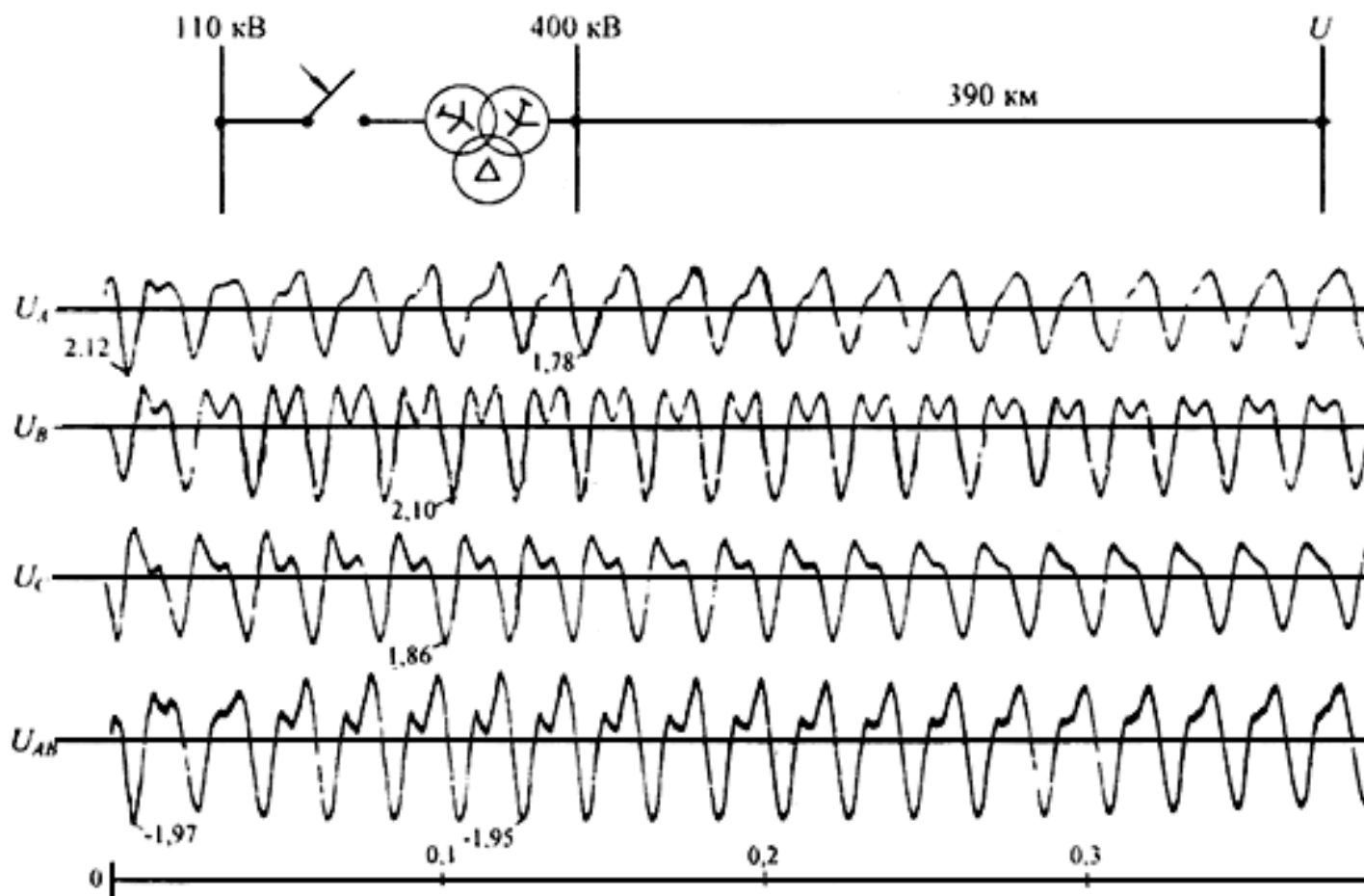


Рис.2.3, а. Перенапряжения на частоте 100 Гц при переходном феррорезонансе. ВЛ Ногинск-Арзамас

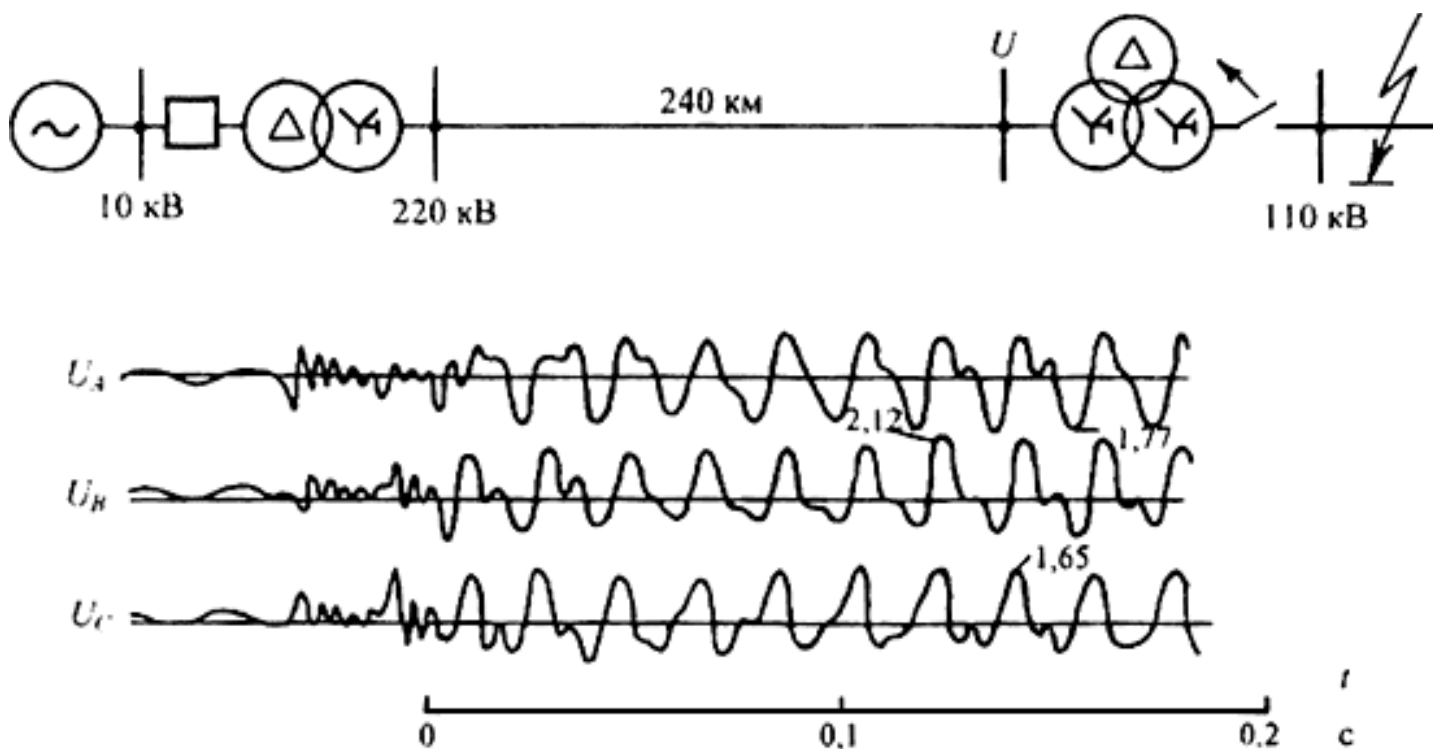


Рис.2.3, б. Перенапряжения на частоте 100 Гц при переходном феррорезонансе на разомкнутом конце

электропередачи 220 кВ Свирская ГЭС - Ленинград при отключении внешнего короткого замыкания

Величина и время существования перенапряжений при явлениях переходного феррорезонанса зависят от значения первой собственной частоты электропередачи β_1 / ω и активных потерь в системе, задаваемых, в первую очередь, активными нагрузками. Такие факторы, как мощность трансформатора, тип выключателя (пофазный или общий привод), характер заземления нейтралей обмоток ВН трансформатора, играют второстепенную роль.

Методы оценки предельных возможных величин перенапряжений при явлениях переходного феррорезонанса и способы защиты от них изложены в Приложении 2.

2.10. Защита от феррорезонансных перенапряжений на частоте 50 Гц, возникающих в электропередачах 220-500 кВ после включения холостых шин с электромагнитными трансформаторами напряжения

Рассматриваются случаи, когда в результате плановых или аварийных коммутаций, например, сборка схемы, предшествующая включению ВЛ, образуется схема, содержащая электромагнитный трансформатор напряжения (ЭМТН) с подключенной к нему ошиновкой, которая со всех сторон отделена от источников питания емкостями C_B , шунтирующими контакты выключателей в сетях 220-500 кВ*.

* В сетях 110 кВ разрывы выключателей емкостями не шунтируются. На электропередачах 750-1150 кВ устанавливаются емкостные трансформаторы напряжения.

В таких ситуациях в сетях 220-500 кВ образуется схема, представляющая собой

колебательный контур, содержащий нелинейную индуктивность высоковольтной обмотки ЭМТН, емкости C_B между разомкнутыми контактами выключателей и емкостями на землю $C_{Ш}$ всех элементов отключенной части ОРУ - разъединителей, втулок выключателей и входных емкостей трансформаторов тока и напряжения.

В табл.2.3 приведены численные значения этих емкостей.

Таблица 2.3

Усредненные численные значения емкостей фаза-земля элементов распределительных устройств

U_H , кВ	220	330	500
Ошиновка, пФ/м	8,2-8,5	9,7-10,0	10,7-13,0
Разъединители, пФ/фазу	100-120	150-180	250-350
Втулки вводов выключателей, пФ	100-150	150-200	250-300
Трансформаторы тока, пФ	400-450	800-850	900-950
ЭМТН, пФ	300-350	350-400	500-600

В таких схемах в зависимости от параметров и начальных условий возможно существование двух принципиально различных периодических режимов. Колебательный процесс на частоте 50 Гц может возникать в линейном контуре, образованном емкостями C_B и $C_{Ш}$ и большой по величине индуктивностью высоковольтной обмотки трансформатора напряжения без насыщения его магнитопровода. Этот режим соответствует малым токам через обмотки и малым перенапряжениям на трансформаторах напряжения.

При определенных сочетаниях параметров и начальных условий в цепи могут возникать также феррорезонансные явления на рабочей частоте, отличающиеся периодическими насыщениями магнитопровода и связанными с ними перенапряжениями на трансформаторе напряжения и большими токами в высоковольтной обмотке. Результаты исследований суммированы зависимостями, представленными на рис.2.4 заштрихованными областями:

если расчетная точка с координатами $C_B + C_{Ш}$; $\frac{C_B}{(C_B + C_{Ш})}$ находится в заштрихованной зоне существования феррорезонанса, то перенапряжения на ЭМТН 220-500 кВ в этом режиме достигают (1,4-1,5) U_{Φ} , а ток высоковольтной обмотки имеет резко выраженную "пикообразную" форму с амплитудой в несколько ампер. Резкое увеличение тока обмотки по сравнению с номинальным (единицы или десятки миллиампер) приводит к термическому повреждению обмотки трансформатора напряжения, что неоднократно имело место в эксплуатационных условиях.

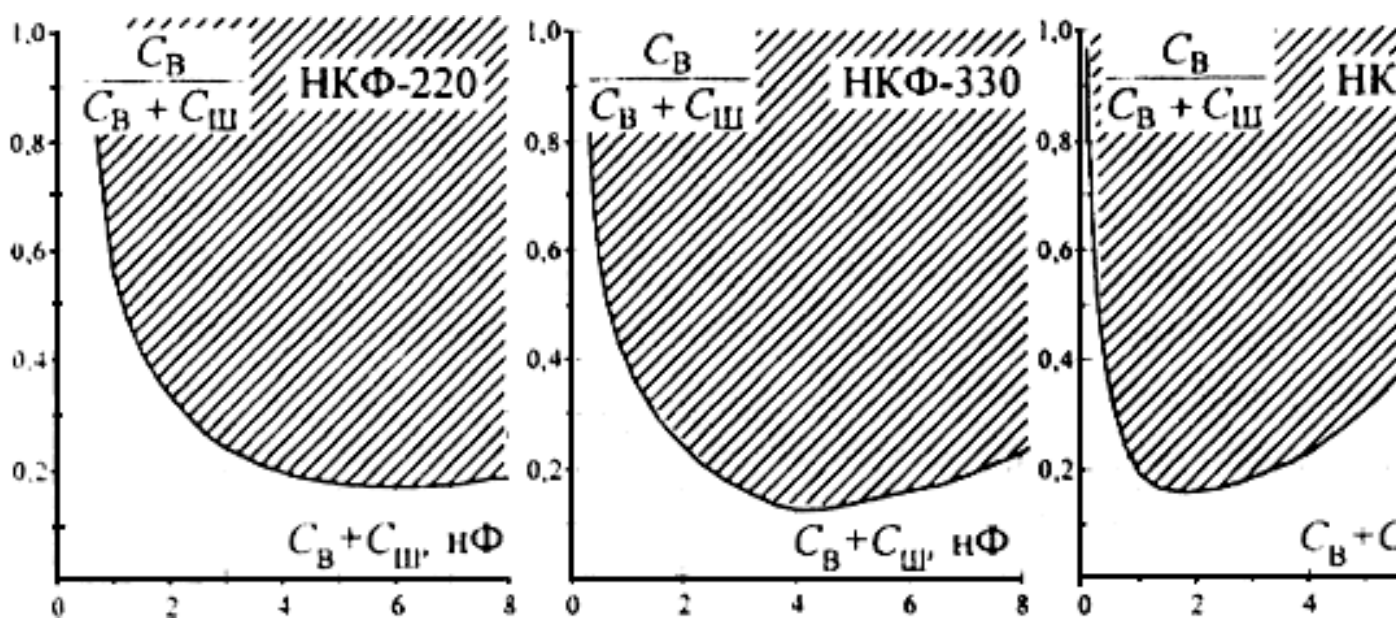


Рис.2.4. Области существования феррорезонансных перенапряжений (заштрихованы):

C_B - суммарная емкость между разомкнутыми контактами всех выключателей;

$C_Ш$ - суммарная емкость на землю всех элементов отключенной части распределительного устройства

Для защиты ЭМТН необходимо выбрать один из нижеследующих способов подавления феррорезонансных перенапряжений:

- Исключение опасного режима работы путем изменения порядка переключений. Например, при аварийном отключении системы шин целесообразно оставлять на ней трансформатор или линию, отключая их со стороны других напряжений, либо с другого конца. При плановых отключениях может оказаться целесообразным сначала отключить все выключатели системы шин, кроме одного, затем - их разъединители и после этого снять напряжение с системы шин последним выключателем. В некоторых случаях может оказаться целесообразным вообще отказаться от коммутаций каким-то аппаратом, например, одним из разъединителей, с тем, чтобы исключить опасную схему распределительного устройства.

- Монтаж и подключение к шинам дополнительных емкостей, например, конденсаторов связи при условии, что их емкость достаточна для выхода расчетной точки из заштрихованной зоны на рис.2.4.

- Отключение разъединителя трансформатора напряжения при аварийном отключении системы шин. Для этого необходим моторный привод разъединителя.

- Если речь идет о вновь проектируемой подстанции, то могут быть рассмотрены возможности применения других выключателей, с меньшими емкостями между контактами, либо подключение электромагнитных трансформаторов напряжения в других точках распределительного устройства. Например, возможен отказ от шинных трансформаторов напряжения и подключение их к линиям.

2.11. Автопараметрическое самовозбуждение ультрагармоник

четной кратности частоты 100 Гц и 200 Гц

Физическая природа автопараметрического самовозбуждения ультрагармоник четной кратности такова. Любая электропередача представляет собой многочастотный колебательный контур, в состав которого входит переменная и притом периодически меняющаяся с частотой 2ω индуктивность контура намагничивания силового

трансформатора. Колебания индуктивности происходит за счет периодических изменений потокосцепления контура намагничивания трансформатора. Это ведет к автопараметрическому резонансу с нарастанием амплитуды вынужденного напряжения во времени. Опыт эксплуатации показал, что самовозбуждение ультрагармоники 100 Гц может стать причиной повреждения оборудования электропередачи. В Приложении 2 изложены методы расчета и выбора комплекса мер, которые либо исключают, либо сводят к минимуму вероятность автопараметрического самовозбуждения четных ультрагармоник частоты 100 Гц и 200 Гц.

РАЗДЕЛ 3. ЗАЩИТА ПОДСТАНЦИЙ 110-750 кВ С ЭЛЕГАЗОВЫМИ КОМПЛЕКТНЫМИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ОТ РЕЗОНАНСНЫХ, ВЫСОКО- И НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ И ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

3.1. Основные подходы

Обобщение мирового опыта эксплуатации комплектных элегазовых распределительных устройств (КРУЭ), проведенное СИГРЭ, указывает на то, что аварийность КРУЭ 110-550 кВ быстро растет по мере увеличения их номинального напряжения, поэтому для достижения высокой эксплуатационной надежности КРУЭ 330 кВ и выше комплекс средств защиты усложняется.

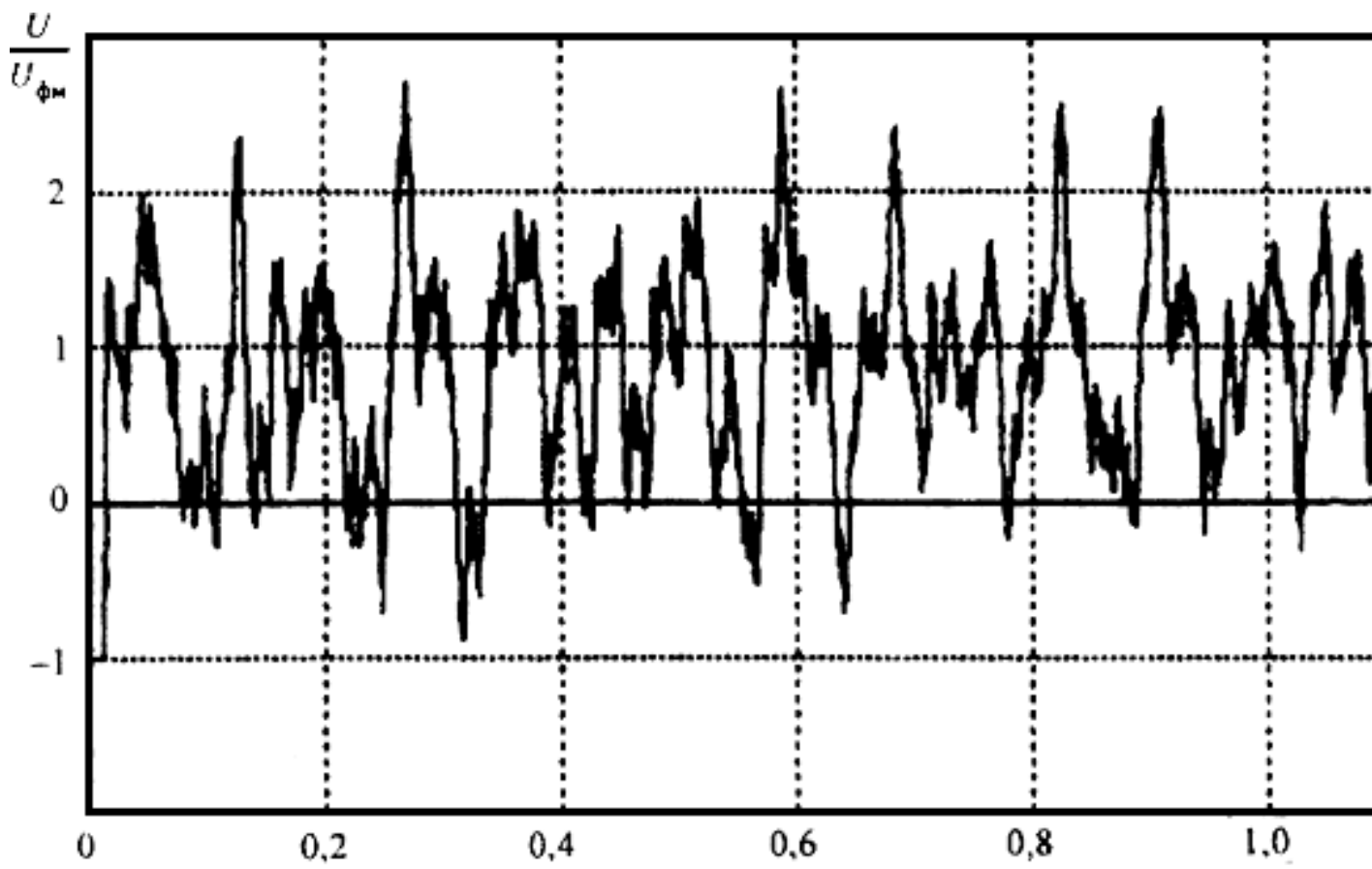
Все элементы КРУЭ с кабельными и обычными вводами и оборудование ПС, куда относятся: подходы присоединений ВЛ, силовые трансформаторы или автотрансформаторы, измерительные трансформаторы, установленные на стороне ВЛ, компенсационные реакторы 500 и 750 кВ и ограничители перенапряжений и др. - подвергаются воздействию двух различных групп перенапряжений.

Первая группа - это резонансные, низкочастотные коммутационные и грозовые перенапряжения, которые имеют место в электрических сетях 110-750 кВ с эффективно заземленной нейтралью. Природа, характеристики и методы расчета этих видов перенапряжений рассмотрены в разделах первом и втором части 1-й, в 3-й части и Приложениях 1-3 и 6 настоящего Руководства.

Вторая группа воздействующих перенапряжений - это высокочастотные, с фронтом 5-20 нс, коммутационные перенапряжения, возникающие при включении или отключении элегазовым разъединителем участков холостых шин КРУЭ. Типичная осциллограмма ВЧ коммутационных перенапряжений показана на рис.3.1*.

* На электрических станциях и подстанциях при ВЧ коммутационных перенапряжениях возникают интенсивные электромагнитные импульсные поля, под воздействием которых в микропроцессорах и микроэлектронных устройствах могут наводиться помехи, опасные для работы систем технологического и оперативного диспетчерского управления. Величина

помехи пропорциональна амплитуде тока I_q , протекающего через коммутирующий элегазовый разъединитель.



Расчет: $U = 2,87 U_{\text{фм}}$

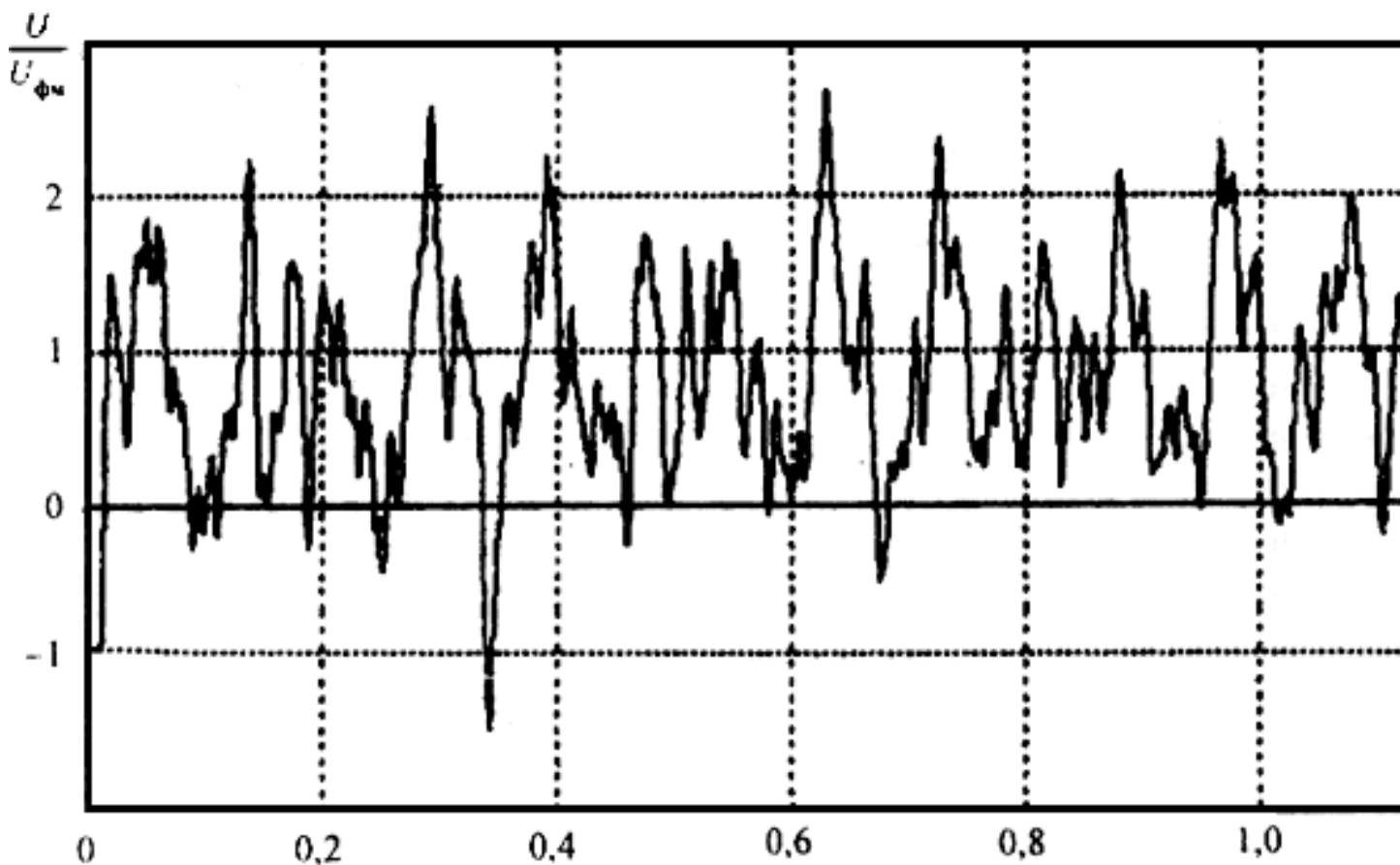


Рис.3.1. Высокочастотные коммутационные перенапряжения в точке 5 на схеме рис.3.2:

$$\Delta U = 2U_{\text{фм}} \cdot \sqrt{L_1 L_2} \approx L_3 + L_4$$

При этих коммутациях, как включениях, так и отключениях, кратность перенапряжений может достигать 2,3-2,8 по отношению к амплитуде фазного максимального рабочего

напряжения $U_{\text{фм}}$. Конкретные их величины зависят от соотношения волновых сопротивлений шинпроводов, компоновки КРУЭ, длин и конфигурации коммутируемых участков и мгновенных значений напряжений на шинах в моменты пробоя межконтактного расстояния разъединителя. Общее количество пробоев в процессе операции определяется скоростью схождения (расхождения) контактов и может достигать сотен, что предопределяет

широкий спектр начальных напряжений $\Delta U(0)$ на шинах, в диапазоне от $+U_{\text{фм}}$ до $-U_{\text{фм}}$. С точки зрения величин перенапряжений, наиболее неблагоприятны условия, когда

$$\Delta U(0) = 2U_{\text{фм}}$$

напряжения на контактах разнополярны и максимальны по величине, т.е. При операции отключения таким условиям отвечает один из последних пробоев, а при включении - один из первых.

Вследствие компактности КРУЭ (обычно коммутируемые участки шинпроводов имеют длину от единиц до нескольких десятков метров) процессы перезаряда емкостей шин характеризуются очень высокими частотами - до десятков мегагерц. Можно оценить

основную частоту k -ой составляющей спектра процесса, определяемую длиной L_k участка шин между двумя неоднородностями по формуле:

$$f(k) = 75 / L_k, \text{ МГц.} \quad (3.1)$$

Таковыми неоднородностями на участках являются разомкнутые концы шинопроводов, узлы переходов воздух-элегаз, вводы силовых трансформаторов, развилки шин (см., например, рис.3.2).

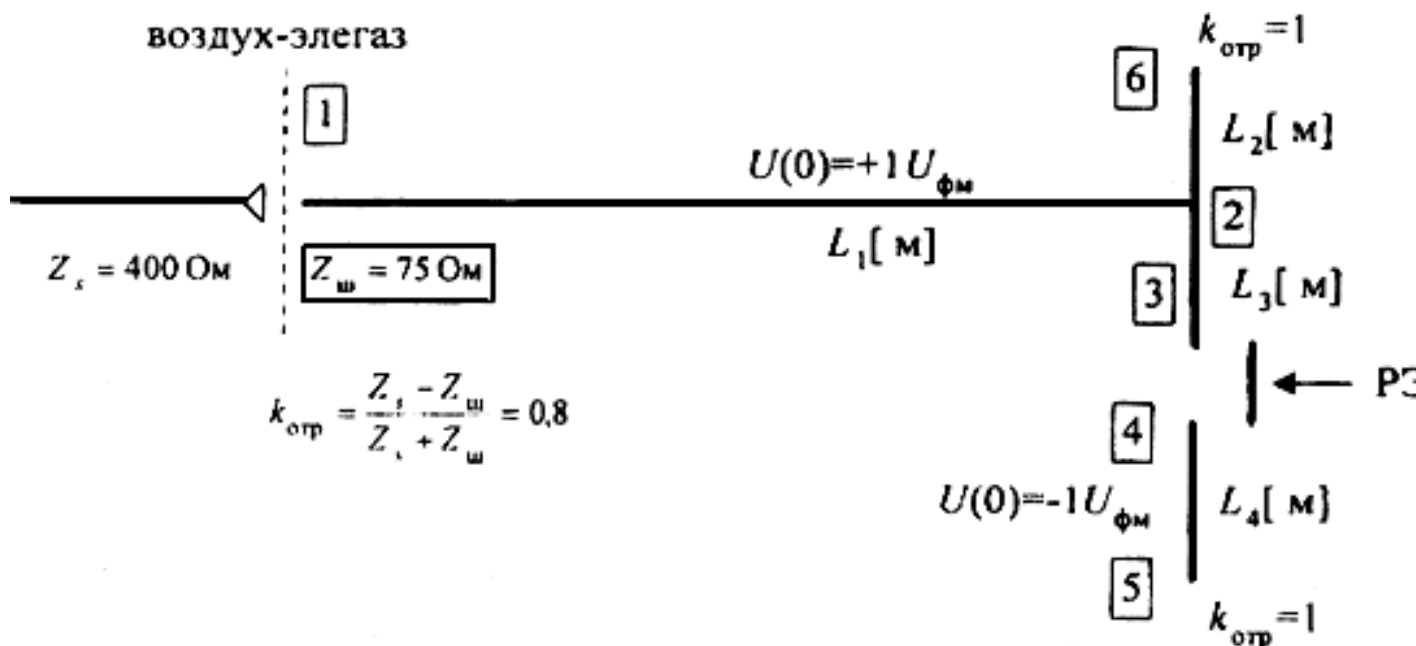


Рис.3.2. Фрагмент компоновки полуторной схемы КРУЭ. РЭ - коммутирующий элегазовый разъединитель

Составляющие частотного спектра проявляются тем сильнее, чем больше неоднородности на границах участков, т.е. чем больше модули коэффициентов отражения: $K = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$, где Z_1 и Z_2 , Ом - величины волновых сопротивлений по ходу движения электромагнитной волны, а также на тех участках токопровода, где коэффициенты отражения имеют разные знаки по концам. Самую низкую частоту, согласно (3.1), определяет наиболее протяженный однородный отрезок шинопровода, как правило, от источника - "питающего конца". Колебания, возбужденные в результате многократных преломлений и отражений волн на отрезках токопроводов, взаимно проникая и накладываясь на самую низкочастотную составляющую спектра, при совпадении во времени амплитуд одного знака в какой-то из точек дают наибольшую кратность перенапряжений.

Наиболее вероятно это совпадение в тех фрагментах компоновок КРУЭ, в которых длины всех участков между узлами неоднородности окажутся кратными длине самого короткого из них. Другими словами, если отношения длин коммутируемых токопроводов L_k и длина максимального из них L_{max} будут правильными дробями ($L_k / L_{\text{max}} = N_k / M_k$, где N_k и M_k - целые числа), то кратность высокочастотных перенапряжений на фазах КРУ, для которых эти условия окажутся выполнены, будут превосходить $2 U_{\text{фм}}$. Правильные дроби определяют гармоники по отношению к низкочастотной составляющей спектра и, чем выше номер гармоники, тем меньше ее амплитуда.

Обобщение большого числа расчетов показало, что максимальные кратности ВЧ-перенапряжений достигаются при выполнении соотношения

$$\sqrt{L_1 L_2} = L_3 + L_4, \quad (3.2)$$

которое уместно называть "критерием правильных дробей". Этот критерий основывается на предположении, что для Т-образной расчетной схемы компоновки КРУЭ, типичной для полупортной схемы, максимальные кратности перенапряжений достигаются при равенстве эквивалентных волновых длин коммутируемых разъединителем участков холостых шинпроводов (см. рис.3.2). Правильность такого подхода для оценки длин токопроводов расчетной схемы, в которой неограниченные ВЧ перенапряжения близки к максимальным, иллюстрируется примером показанного на рис.3.2 Т-образного фрагмента полупортной схемы (см. также данные табл.3.1).

Таблица 3.1

№ вар.	Относительные длины участков				Критерий (3.2)	
	L_1	L_2	L_3	L_4	$\sqrt{L_1 L_2}$	$L_3 + L_4$
1	1	2/3	1/3	1/2	0,816	0,833
2	1	1/3	1/4	1/3	0,577	0,588
3	1	1/4	1/6	1/3	0,500	0,500
4	1	1/2	1/7	4/7	0,707	0,714

Критерий правильных дробей (3.2) позволяет оценить как форму, так и максимальные возможные кратности ВЧ-перенапряжений, так как в относительных единицах они практически неизменны. Это означает, что при равенстве соотношений длин однородных участков шинпроводов и указанных в табл.3.2 входных емкостей встроенного оборудования (выключателей, разъединителей, трансформаторов тока и напряжения и др.) формы кривых и амплитуды ВЧ-перенапряжений для КРУЭ разных классов номинального напряжения будут подобны.

Таблица 3.2

Усредненные значения входных емкостей встроенного оборудования

Аппараты	Входная емкость, пФ, при номинальном напряжении, кВ				
	110	220	330	500	750
Силовой трансформатор	1000	2000	3000	3000	5000
Силовой автотрансформатор	1500	2000	3000	5000	6000
Компенсационный реактор	-	-	-	2000	3000
Трансформатор напряжения	200	300	400	500	600

электромагнитный					
Трансформатор тока	300	400	500	600	700
Разъединитель	100	100	150	200	250
Выключатель	100	150	250	250	350
Ограничитель типа ОПП	60	80	100	150	200

Естественно, что мероприятия по их ограничению должны быть одинаковы, если уровни изоляции элементов КРУЭ приняты одинаковыми. Если левая и правая части критерия правильных дробей (3.2) отличаются друг от друга не более, чем на $\pm(5-7)\%$, то амплитуды ВЧ-перенапряжений будут в пределах

$$1,7 \leq U_{\text{вч}} / U_{\text{фм}} \leq 2,5$$

3.2. Возможное снижение электрической прочности элегазовой изоляции КРУЭ в процессе его эксплуатации

При тщательно очищенных и полированных металлических поверхностях элементов КРУЭ электрическая прочность элегазовой изоляции при воздействии ВЧ-перенапряжений примерно в полтора раза превосходит прочность этой изоляции при воздействии грозового импульса. При шероховатости электродов порядка 0,1-0,3 мм электрическая прочность практически одинакова при воздействии ВЧ-перенапряжений и грозовых импульсов. При появлении на поверхности шинпровода металлических частиц длиной 2-6 мм и воздействии ВЧ-перенапряжений электрическая прочность оказывается почти вдвое ниже, чем при воздействии грозовых перенапряжений. Такие свободные металлические частицы, обычно именуемые термином "дефекты", могут появиться во время транспортировки и в процессе эксплуатации КРУЭ.

Выбранная для иллюстрации на рис.3.2 полуторная схема компоновки КРУЭ имеет следующие конкретные особенности, видные из расчетной схемы, показанной на рис.П7.1 Приложения 7. В процессе оперативной коммутации сборки схемы элегазовым разъединителем Р9, когда разъединители Р6 и Р7 и внешний, за разделом "элегаз-воздух", выключатель разомкнуты, на элементах Т-образного фрагмента участков холостых шинпроводов (см. рис.3.2) возможно наложение длительного, порядка 80-100 часов, квазипостоянного напряжения $U_{\text{пост}}$ на ВЧ-перенапряжения, неограниченная амплитуда

которых (см. осциллограммы на рис.3.1) может превышать $2,5 U_{\text{фм}}$. Если оперативная коммутация сборки схемы выполняется элегазовым разъединителем Р5 (элегазовый выключатель В2 и разъединители Р1 и Р4 отключены), наложение на ВЧ-перенапряжения квазипостоянного напряжения маловероятно, так как последнее из-за встроенного измерительного трансформатора тока стечет за несколько часов. Постоянное напряжение на холостом шинпроводе снижает электрическую прочность элегазовой изоляции в объеме, что связано с налипанием свободных металлических частиц на шинпровод.

3.3. Технические средства для защиты изоляции КРУЭ и оборудования ПС от перенапряжений

Подстанции 110-750 кВ с КРУЭ подвергаются воздействию грозовых, низко- и высокочастотных коммутационных и резонансных перенапряжений и должны быть надежно защищены от них. Комплекс для защиты изоляции газонаполненных элементов КРУЭ и

оборудования ПС может включать в свой состав следующие технические средства:

- нелинейные ограничители перенапряжений как обычного исполнения (ОПН), так и в элегазе (ОПНЭ), для ограничения амплитуд низкочастотных коммутационных перенапряжений, возникающих при коммутациях ненагруженных воздушных линий и силовых трансформаторов (автотрансформаторов), и грозовых перенапряжений, набегающих с ВЛ. Защитные и надежность характеристики ограничителей типа ОПН и ОПНЭ приведены в Приложении 4;

- предвключаемые резисторы в элегазовых выключателях, снижающие амплитуду низкочастотных коммутационных перенапряжений при плановых включениях линий, а при аварийном отключении ВЛ из-за неуспешного АПВ или ОАПВ, снижающие амплитуду и скорость напряжения, восстанавливающегося на контактах коммутирующего элегазового выключателя;

- встроенные в элегазовые разъединители предвключаемые резисторы двустороннего действия, уменьшающие амплитуду и растягивающие фронт высокочастотных коммутационных перенапряжений, возникающих при коммутациях участков холостых шин проводов КРУЭ в процессе сборки (или разборки) схемы ПС;

- снижение сопротивления заземления опор и повышение эффективности тросовой защиты ВЛ на подходах к ПС, что ограничивает амплитуду и число волн грозовых перенапряжений, набегающих с воздушной линии на подстанцию.

Для каждой ПС с КРУЭ возможно применение нескольких вариантов комплекса защитных средств, в той или иной мере отличающихся как по составу, так и по параметрам входящего в состав защитного комплекса технических средств. Окончательный выбор варианта должен основываться на сопоставлении технико-экономических показателей и прогнозируемого уровня эксплуатационной надежности.

3.4. Защита КРУЭ от резонансных перенапряжений

Защита от резонансных перенапряжений должна быть направлена на то, чтобы либо полностью исключить в соответствующих расчетных режимах (см. в Разделе 2 "Резонансные перенапряжения", пункт 2.1 "Исходные положения") возможность повышения частоты 50 Гц

сверх наибольшего рабочего U_m , равного:

U_n , кВ	110	220	330	500	750
U_m , кВ	126	252	363	525	787

либо, если это оказывается экономически нецелесообразным, создать такие условия, при которых резонансные перенапряжения безопасны для КРУЭ и оборудования ПС. В табл.1.2, 1.3 указаны допустимые повышения напряжения 50 Гц для оборудования 110-750 кВ. Ограничение резонансных перенапряжений осуществляется вне КРУЭ на входящих и выходящих из КРУЭ присоединениях. Методы расчета величины и времени воздействия, а также выбор состава комплекса защитных мер, обеспечивающего ограничение уровня и длительности воздействия резонансных перенапряжений, изложены в Приложении 2.

Если все элементы КРУЭ и встроенного оборудования выдержали послемонтажные испытания по нормативам МЭК (см. Приложение 9), а внешний по отношению к КРУЭ комплекс защитных мер и аппаратов ограничивает воздействия:

- на изоляцию вводов "воздух-элегаз", воздушных присоединений, силовых и измерительных трансформаторов 110, 220, 330, 500 и 750 кВ соответственно до 73, 146, 257,

303 и 560 кВ;

- на ограничители типа ОПН в соответствии с табл.П4.1-П4.4 Приложения 4, то система защиты от резонансных перенапряжений является достаточной.

3.5. Защита КРУЭ от низкочастотных коммутационных перенапряжений

Защита от низкочастотных коммутационных перенапряжений, воздействующих на изоляцию оборудования ПС, в состав которой входят подходы присоединений ВЛ, вводы "воздух-элегаз", измерительные трансформаторы тока и напряжения, установленные на стороне ВЛ, компенсационные реакторы 500 кВ и 750 кВ, элегазовые выключатели, разъединители, шинопроводы, элегазовые измерительные трансформаторы тока и напряжения, осуществляется ограничителями перенапряжений типа ОПН и ОПНЭ. Защитные характеристики ограничителей типа ОПН и элегазовых типа ОПНЭ должны быть одинаковы (см. Приложение 4).

Если общее число ограничителей ОПН и ОПНЭ, установленных как в самом КРУЭ, так и на всех входящих и выходящих из КРУЭ присоединениях, $n = n_{\text{ОПН}} + n_{\text{ОПНЭ}}$, то амплитуда воздействующих на оборудование ПС и газонаполненные элементы КРУЭ низкочастотных коммутационных перенапряжений определяется неравенством:

$$k_{\text{возд}} \leq k_{\text{защ}} / n^{\alpha} = k_{\text{защ}} / n^{0,04}, \text{ кВ.} \quad (3.3)$$

Выбор системы защиты от низкочастотных коммутационных перенапряжений состоит в следующем. Если рассчитанное по формуле (3.3) $k_{\text{возд}}$ превышает $k_{\text{доп}}$, которое, согласно нормативам МЭК (см. Приложение 9), равно:

$U_{\text{н}}$, кВ	110	220	330	500	750
$k_{\text{доп}}$, кВ	-	-	950	1175	1425

то число ограничителей типа ОПН увеличивается до $n'_{\text{ОПН}} > n_{\text{ОПН}}$, при котором выполняется условие

$$k_{\text{возд}} = \frac{k_{\text{защ}}}{(n'_{\text{ОПН}} + n_{\text{ОПНЭ}})^{0,04}} \leq k_{\text{доп}}, \text{ кВ} \quad (3.4)$$

По указанным в Приложении 9 нормативам МЭК выполняются послемонтажные испытания газонаполненных элементов КРУЭ и встроенного оборудования. Если все газонаполненные элементы КРУЭ и встроенного оборудования эти испытания выдержали, то система защиты от низкочастотных коммутационных перенапряжений является достаточной.

3.6. Грозозащита оборудования ПС и КРУЭ

Следует обеспечить грозозащиту как КРУЭ и подходов входящих и выходящих присоединений ВЛ, так и питающих КРУЭ блочных трансформаторов (автотрансформаторов).

Расчеты, целью которых является формирование комплекса мер грозозащиты оборудования КРУЭ и ПС, а также подходов воздушных присоединений, выполняются по методам и программам, изложенным в 3 части настоящего Руководства. Этот комплекс мер включает

средства, направленные на снижение числа набегающих волн за счет повышения грозоупорности ВЛ на подходе к ПС (снижение сопротивления заземления опор, повышение эффективности тросовой защиты) и ограничение амплитуд грозовых воздействий за счет использования ограничителей типа ОПН, элегазовых ограничителей типа ОПНЭ и др. средств. Этот комплекс должен ограничить амплитуды атмосферных перенапряжений, воздействующих на внутреннюю изоляцию компенсирующих реакторов и блочных трансформаторов (автотрансформаторов) до уровня, определяемого нормативами МЭК (см.

Приложение 9), но не более, чем до $(2,5-2,6) U_{фм}$, т.е. до величины, когда надежность работы внутренней изоляции определяется не грозовыми перенапряжениями, а длительным воздействием рабочего напряжения частоты 50 Гц.

Для того, чтобы амплитуды волн грозовых перенапряжений не превзошли этой величины, защита должна быть выполнена следующим образом. Вблизи, на расстоянии 15-20 метров от питающего КРУЭ блочного трансформатора (или АТ) устанавливаются два ограничителя типа ОПН: один - между блочным трансформатором и КРУЭ на входящем в последнее воздушном присоединении, второй - на ВЛ между блочным трансформатором и генераторными шинами. Эффективность такой системы грозозащиты внутренней изоляции блочных трансформаторов (АТ) иллюстрируется примером расчета, изложенным в Приложении 7.

3.7. Защита КРУЭ от высокочастотных коммутационных перенапряжений

Газонаполненный шинопровод КРУЭ при испытаниях на месте монтажа должен выдержать воздействие грозового импульса, нормируемого МЭК (см. Приложение 9).

Для обеспечения высокой эксплуатационной надежности КРУЭ 330-750 кВ необходима эффективная защита от воздействия высокочастотных коммутационных перенапряжений.

Использование для защиты от высокочастотных коммутационных перенапряжений ограничителей типа ОПНЭ и тем более, типа ОПН, малоэффективно по следующим причинам. Во-первых, при частотах порядка 5-15 МГц ограничитель электрически удален от места появления максимальных перенапряжений. Во-вторых, вольт-амперная характеристика ограничителя при наносекундных воздействиях оказывается заметно выше, чем диктуемый нормативами МЭК уровень защиты от грозовых перенапряжений, поэтому наиболее эффективным средством обеспечения эксплуатационной надежности КРУЭ при ВЧ-коммутационных перенапряжениях является оснащение элегазового разъединителя встроенным предвключаемым резистором двустороннего, на включение и отключение, действия*.

* Использование элегазового разъединителя с предвключаемым резистором решает также задачу уменьшения импульсных помех, величина которых прямо пропорциональна амплитуде ВЧ-перенапряжений, где Z_w - волновое сопротивление коммутируемого разъединителем участка шинопровода.

Высокая эксплуатационная надежность работы КРУЭ 330-750 кВ обеспечивается, когда амплитуды ВЧ коммутационных перенапряжений ограничиваются до уровня менее $(1,0-1,05) U_{фм}$. Для этого величина активного сопротивления предвключаемого резистора должна быть

$$R_{пр} \geq 2Z_w \quad (3.5)$$

Предвключаемый резистор должен быть термостойким, т.е. поглощать без повреждения

энергию, выделяющуюся в нем во время коммутации и не должен нарушать общего температурного режима элегазового разъединителя.

РАЗДЕЛ 4. ЗАЩИТА ПРОДОЛЬНО- И ПОПЕРЕЧНОКОМПЕНСИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ОТ КОММУТАЦИОННЫХ И ГРОВОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

4.1. Исходные положения

Использование в электропередаче одной или нескольких установок продольной емкостной компенсации (УПК) приводит к перенапряжениям, возникающим на поврежденных фазах в переходном режиме после разрыва электропередачи, вызванного отключением аварийного участка. Приводящий к перенапряжениям аварийный процесс распадается на два этапа: режим короткого замыкания, в ходе которого падение напряжения от аварийного тока приводит к перенапряжениям на конденсаторах УПК, и переходный режим после разрыва электропередачи, вызванного отключением ее аварийного участка. В ходе этого переходного процесса возникают как коммутационные, так и резонансные, при делении частоты, перенапряжения относительно земли, которые локализуются на участке между УПК и выключателем, отключившим аварию (на схеме рис.4.1, а - это точка присоединения реактора X_{P3}). В зависимости от схемы подстанции перенапряжения могут воздействовать на изоляцию компенсационных реакторов, силовых трансформаторов и другого оборудования, которое подключено к этим шинам. Природа этих перенапряжений и методы защиты от них излагаются ниже в пунктах 4.2 и 4.3.

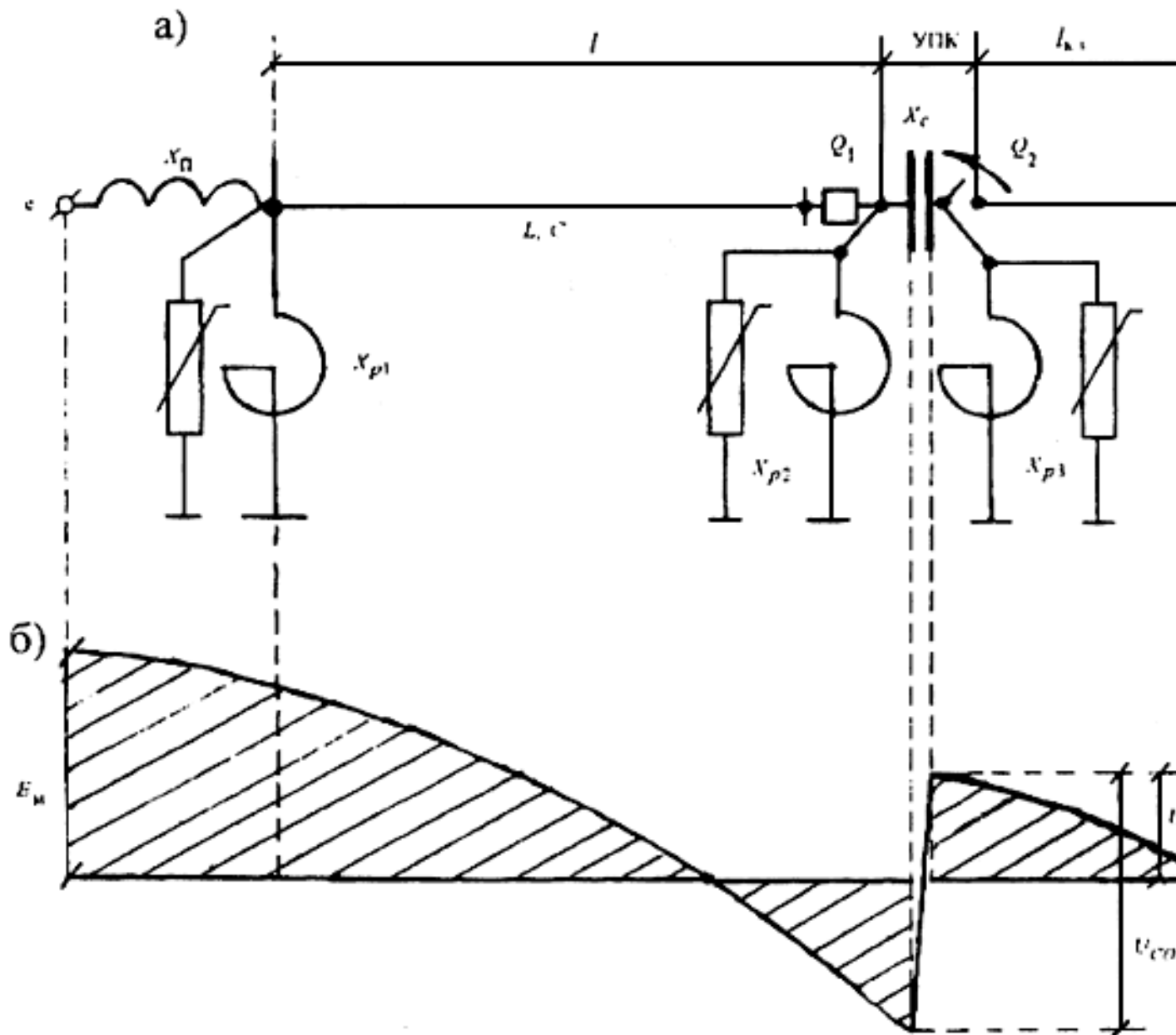


Рис.4.1. Однолинейная схема продольно- и поперечнокомпенсированной электропередачи (а) и эпюра распределения напряжения вдоль линии в первый момент после погасания дуги в выключателе, отключающем аварийный участок или аварийную фазу (б)

X_C - емкостное сопротивление батареи УПК;

X_P - индуктивное сопротивление источника питания (станция, система);

$l_{кз}$ - расстояние от точки к.з. до батареи УПК в км;

L и C - индуктивность и емкость ВЛ на 1 км;

B^1 и B^2 - линейные выключатели

4.2. Особенности коммутационных и резонансных при делении частоты, перенапряжений в продольно- и поперечнокомпенсированных электропередачах

Особенности коммутационных и резонансных перенапряжений в продольно- и поперечнокомпенсированных передачах таковы. Если ВЛ оборудована УПК, то цепь статоров генераторов электрических станций представляет колебательный контур. Вследствие этого изменяется характер свободных составляющих тока короткого замыкания. Аperiodическая составляющая заменяется медленно затухающими свободными колебаниями. К моменту

отключения к.з. на батарее УПК будет повышенное напряжение U_{c0} (см. рис.4.1). Вследствие этого величина коммутационных перенапряжений, воздействующих на реактор

X_{P3} , после гашения выключателем В² тока короткого замыкания будет больше, чем в электропередачах, не оборудованных УПК. Амплитуда этих перенапряжений складывается из трех составляющих: вынужденного напряжения частоты 50 Гц и двух свободных затухающих - низкочастотной и высокочастотной. Низкочастотная определяется колебательным контуром,

состоящим из емкости батареи УПК и суммарной индуктивности $X_{п}$ линии передачи и

реактора X_{P3} . Высокочастотная составляющая в основном определяется наименьшей из частот собственных колебаний ВЛ и источника питания. В первый момент после отключения

выключателя В² вынужденная и низкочастотная составляющая находятся в фазе друг с другом, а свободная высокочастотная - в противофазе с ними. В переходном режиме аварийного разрыва передачи вследствие ликвидации к.з. во всех случаях, когда длина участка линии $l \geq 0$, батарея УПК оказывается включенной между источником э.д.с. и имеющим нелинейную характеристику намагничивания компенсационным реактором (см.

формулу (2.3) и табл.2.1). На схеме рис.4.1, а это реактор X_{P3} . В таких нелинейных колебательных контурах при определенных условиях может возникнуть режим деления частоты на три (режим субгармонического резонанса), при котором полный период повторяемости токов и напряжений, действующих в электрической сети, в три раза превосходит период изменения э.д.с., питающей систему, следовательно, частота колебаний в

режиме субгармонического резонанса равна $f = 50/3 = 16\frac{2}{3}$ Гц. Деление частоты опасно как перенапряжениями, которые при этом возникают, так и значительными механическими воздействиями на реактор в виде динамических усилий и вибраций вследствие появления сверхтоков и низкочастотных потоков с большой амплитудой. Режим субгармонического резонанса иллюстрирует рис.4.2, на котором показаны осциллограммы сверхтоков и низкочастотных перенапряжений, воздействующих в режиме деления частоты

на УПК и компенсационный реактор X_{P3} (осциллограммы получены для электропередачи 500 кВ Волжская ГЭС - переключательный пункт Арзамас).

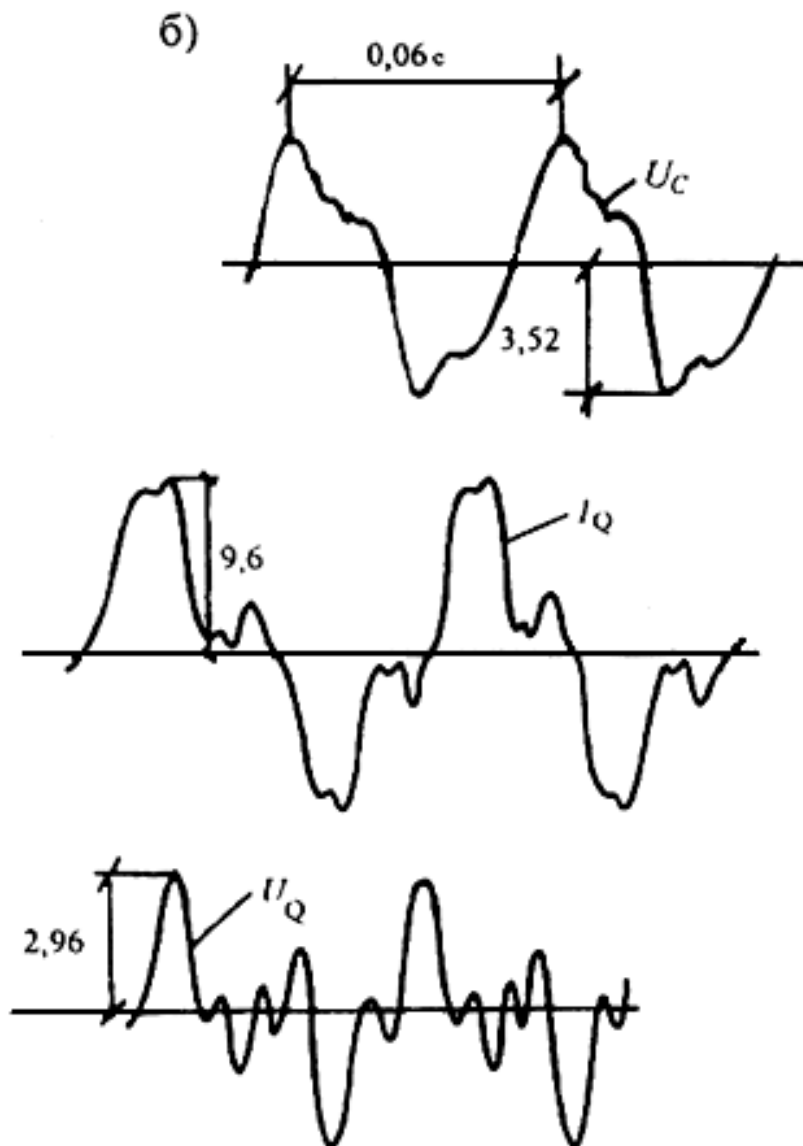
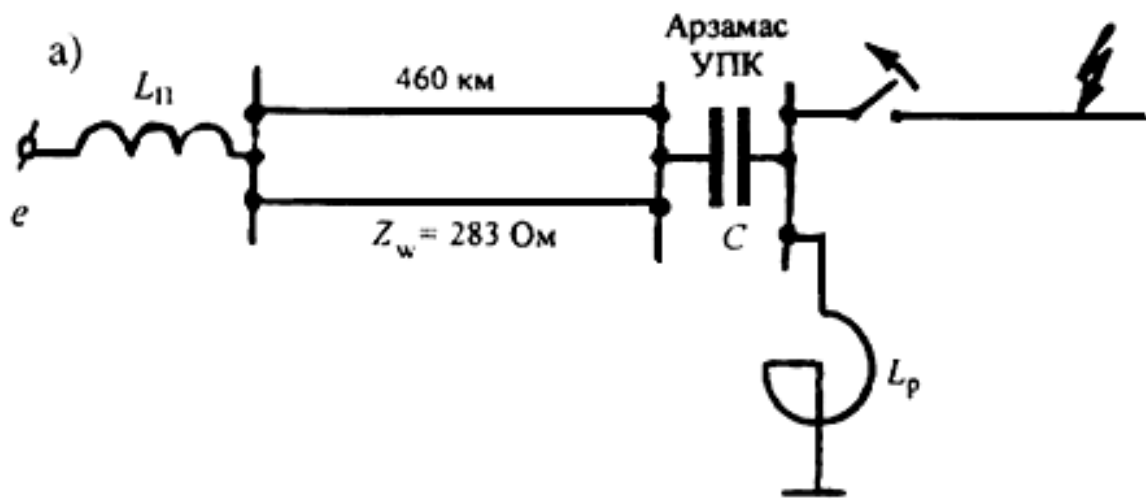


Рис.4.2. Схема электропередачи 500 кВ Волжская ГЭС - Москва (а) и осциллограммы напряжений

и токов при делении частоты (б)

U_C - напряжение на батарее УПК;

$U_{\mathcal{Q}}$ - напряжение на реакторе $L_{\mathcal{P}}$;

$I_{\mathcal{Q}}$ - ток через обмотку реактора $L_{\mathcal{P}}$;

$L_{\mathcal{П}}$ - 105 мГн; $C = 61$ мкФ; $L_{\mathcal{P}} = 3,4$ Гн

Вероятность возникновения режима деления частоты тем больше, чем меньше напряжение $U_{\mathcal{L}\mathcal{O}}$ и чем больше напряжение $U_{\mathcal{C}\mathcal{O}}$, показанные на рис.4.1, б. Если на продольно- и поперечнокомпенсированной электропередаче возник режим деления частоты, то ограничители перенапряжений, установленные параллельно реакторам для защиты последних от коммутационных и грозовых перенапряжений, не только не выполняют защитных функций, но и сами могут разрушиться (см. схему на рис.4.1, а).

4.3. Защита продольно- и поперечнокомпенсированных электропередач от коммутационных и резонансных перенапряжений

Система защиты продольно- и поперечнокомпенсированных электропередач должна решить две взаимосвязанные задачи. Необходимо исключить возможность существования режима деления частоты (режима субгармонического резонанса) и обеспечить такой же срок службы ОПН, как и в передачах без УПК. Обе эти задачи могут быть решены двумя путями.

Первый - это установка показанного на рис.4.3 разрядника с уставкой k_0 , который должен в режиме к.з. шунтировать батарею УПК. $U_{\mathcal{C}\mathcal{O}}$ при этом в послеаварийном режиме разрыва передачи выключателем B^2 уменьшается до нуля, что исключает возможность реализации режима субгармонического резонанса, а коммутационные перенапряжения снижаются до уровня, присущего электропередачам без УПК. Эта цель достигается, если выполнено неравенство

$$k_{01} \leq U_{\mathcal{C}1} \leq U_{\mathcal{C}2} \quad (4.1a)$$

Здесь

$$U_{\mathcal{C}1} = \frac{E_1 X_{\mathcal{C}}}{X_{\mathcal{П}2} + X_{\mathcal{Л}1} + X_{\mathcal{Л}2} - X_{\mathcal{C}}}, \quad U_{\mathcal{C}2} = \frac{E_2 X_{\mathcal{C}}}{X_{\mathcal{П}1} + X_{\mathcal{Л}1} - X_{\mathcal{C}}}, \quad (4.1b)$$

где k_{01} - нижний предел разбросов пробивного напряжения разрядника; $X_{\mathcal{C}}$ - емкостное сопротивление батареи УПК; $X_{\mathcal{П}1}$ и $X_{\mathcal{П}2}$ - минимальное и максимальное значения за год индуктивного сопротивления источника питания; $X_{\mathcal{Л}1} = l_1 \omega L_1$ и $X_{\mathcal{Л}2} = l_2 \omega L_2$ - индуктивные сопротивления участков l_1 и l_2 ; L_1 и L_2 - индуктивности линии на 1 км, которые в общем случае могут отличаться друг от друга (например, l_1 - двухцепная ВЛ, а l_2 - одноцепная ВЛ); E_1 и E_2 разъяснены в табл.1.5. Если расчет показал, что для данной конкретной передачи неравенство (4.1a) нарушено, то либо следует отказаться от защиты УПК с помощью обычного, в том числе, калиброванного герметизированного, искрового промежутка, либо использовать разрядник с искусственным поджигом. Конструкции таких

разрядников разработаны как в опорном, так и в подвесном вариантах. Опыт эксплуатации подтвердил их эффективность, но они заметно дороже искрового промежутка без поджига.

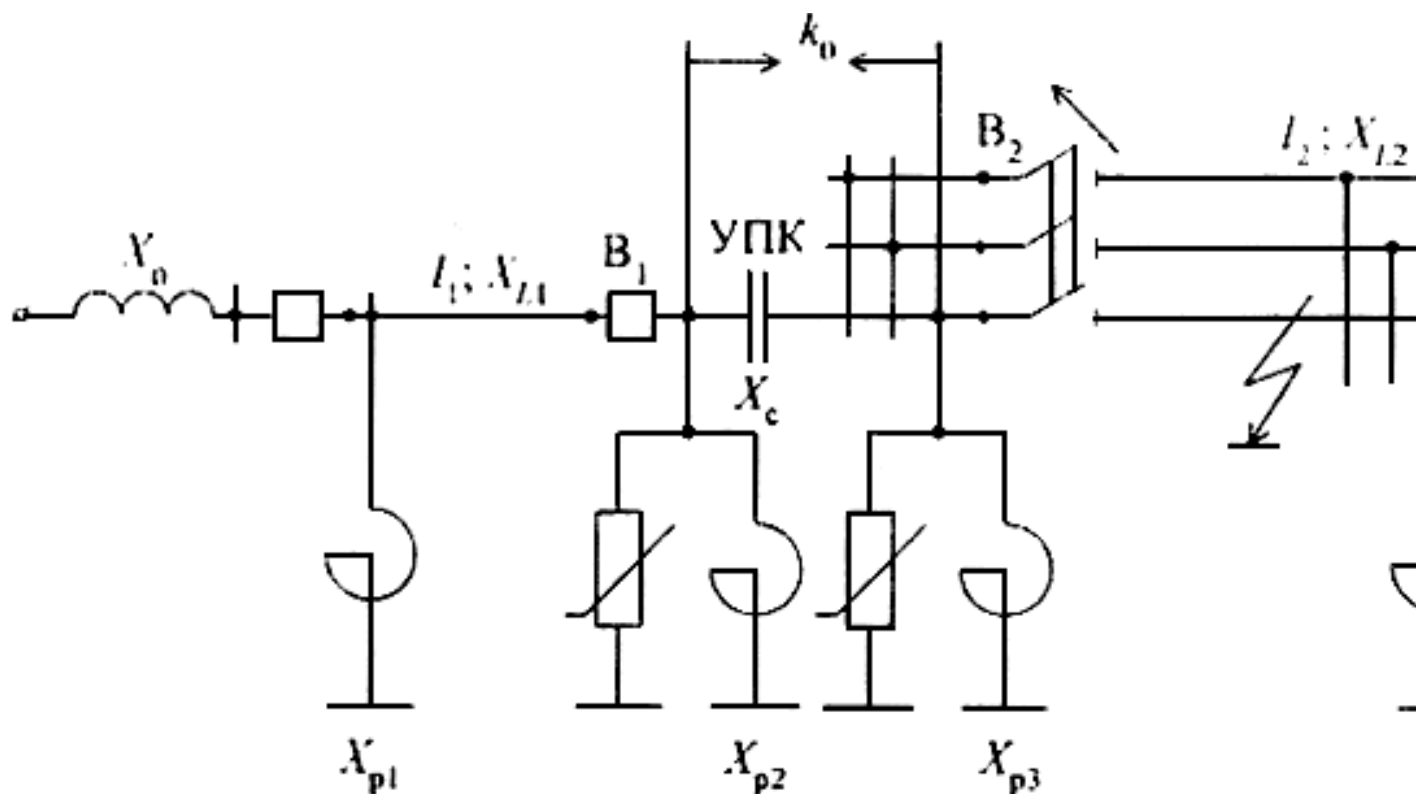


Рис.4.3. Расчетная схема продольно и поперечно компенсированной электропередачи

k_0 - уставка разрядника, защищающего УПК в режиме к.з.;

B^2 - выключатель, отключающий ток короткого замыкания

Второй способ защиты продольно- и поперечнокомпенсированных электропередач состоит в отказе от использования защитного разрядника и размещении компенсационных реакторов X_{P2} и X_{P3} по схеме, показанной на рис.4.4. Здесь компенсационные реакторы вынесены

за линейные выключатели B^1 и B^2 , т.е. установлены не на шинах УПК, а непосредственно на участках ВЛ. Такое размещение реакторов исключает возможность режима деления частоты, так как при любом послеаварийном разрыве электропередачи батарея УПК не может оказаться между нелинейным реактором и источником э.д.с. Однако в схеме рис.4.4 для защиты шин УПК от коммутационных и грозовых перенапряжений необходима установка двух дополнительных комплектов ограничителей ОПН-2 и ОПН-3. Их условия

работы утяжелены, так как из-за отсутствия разрядника k_0 напряжение U_{CO} на емкости батареи УПК в режиме к.з. не равно нулю, и, следовательно, уровень неограниченных коммутационных перенапряжений в точке установки ОПН-3 (или ОПН-2) в этой схеме будет выше, чем в электропередачах без УПК.

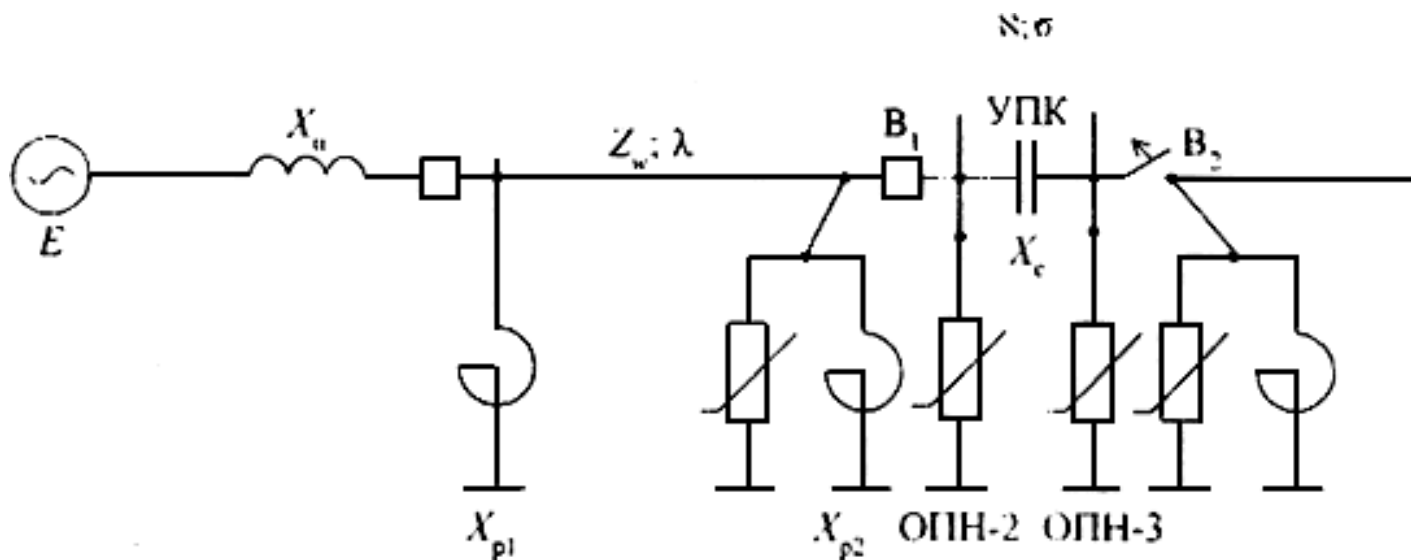


Рис.4.4. Размещение реакторов, при котором на продольно и поперечно компенсированной электропередаче

невозможен субгармоничный резонанс. ОПН-2 и ОПН-3 дополнительные комплекты ограничителей,

необходимые для защиты шин УПК

Расчет статистического распределения амплитуд этих перенапряжений выполняется следующим образом. Рассчитываются минимальное N_1 и максимальное N_2 значения случайных изменений ударных коэффициентов за год по формулам:

$$N_1 = 0,72 + 1,14 U_{c1} \sqrt{\frac{Z_w}{X_C}}, \quad N_2 = 0,72 + 1,14 U_{c2} \sqrt{\frac{Z_w}{X_C}}, \quad (4.2)$$

где U_{c1} и U_{c2} заданы формулами (4.16).

Вынужденное напряжение в месте установки ограничителя ОПН-3 дается следующей формулой:

$$U = E \frac{X_{P1}}{X_{\Pi} + X_{P1}} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\cos(\lambda + \varphi_1 - \varphi_2)} \left(1 + \frac{\omega \pi}{\beta} \right), \quad (4.3a)$$

$$\varphi_1 = \arctg \left(\frac{X_{\Pi} X_{P1}}{(X_{\Pi} + X_{P1}) Z_w} \right), \quad \varphi_2 = \arctg \left(\frac{Z_w}{X_{P2}} \right), \quad (4.3b)$$

где

причем входящая в (4.3a) частота β / ω определяется по номограмме Приложения 3, т.е. по схеме вида "э.д.с. - предвключенная реактивность X_{Π} - ВЛ длиной l ", так как влияние компенсационных реакторов X_{P1} и X_{P2} на частоту β мало.

Подставляя в формулы (4.3а) и (4.3б) минимальное $X_{П1}$ и максимальное $X_{П2}$ за год значения индуктивного сопротивления источника, а также E_1 и E_2 (см. табл.1.5 Раздела 1), находим пределы v_1 и v_2 интервала случайных годовых колебаний вынужденного напряжения. Затем по формулам

$$k_1 = N_1 v_1; \quad k_2 = N_2 v_2 \quad (4.4)$$

рассчитывают границы предела случайных годовых изменений амплитуд неограниченных коммутационных перенапряжений в точке установки ограничителя ОПН-3.

Статистическое распределение кратностей неограниченных коммутационных перенапряжений дается выражением

$$P_k(k_1 \leq k \leq k_2) = \frac{(k - k_1)k_2}{(k_2 - k_1)k} \quad (4.5)$$

Методика оценки надежности, т.е. ожидаемого с доверительной вероятностью $P_{дов}$ числа лет безаварийной работы ограничителя (в данном случае это ОПН-3 или ОПН-2) излагается в п.4 Приложения 6 и иллюстрируется примером, приведенным в Приложении 8.

ПРИЛОЖЕНИЯ К ЧАСТИ 1

ЗАЩИТА ОТ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 110-1150 кВ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ОЦЕНКА ЧИСЛА ВОЗДЕЙСТВИЙ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ИЗОЛЯЦИЮ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ТОКОВЫХ НАГРУЗОК НА РЕЗИСТОРЫ ОПН ЗА ГОД

Накопленная в течение многих лет в различных странах статистика свидетельствует, что в общем числе к.з. доля однофазных увеличивается с ростом номинального напряжения электропередачи. При этом доля неуспешных ОАПВ после грозового поражения и перекрытия вследствие загрязнений гирлянд в среднем составляет 0,25 и 0,35 для ВЛ 110-330 кВ и 550-1150 кВ соответственно. Из общего числа ТАПВ для всех классов напряжения в среднем 40% бывают неуспешны.

Усредненные значения ожидаемого числа n_s плановых и аварийных коммутаций и ожидаемого числа к.з. приведены в табл.П1.1.

Таблица П1.1

Усредненное число n_s ожидаемых за год коммутаций и к.з.

S	Виды аварий или коммутаций	Число n_s аварий или коммутаций для электропередач, кВ
---	----------------------------	--

		110	220	330	500	750	1150
1	Плановое включение линии	5-8	5-8	3-6	3-5	1-3	1-3
2	Плановое отключение линии и трансформаторов	5-8	5-8	3-6	3-5	1-3	1-3
3	К.з. грозового происхождения	По расчету ожидаемого числа грозовых отключений (см. часть 3)					
	Удельное число отключений, т.е. в расчете на 100 км ВЛ по причине:						
4	к.з. в нормальном режиме вследствие загрязнений и увлажнений изоляции линии	2	1,2	0,16	0,13	0,12	0,15
5	к.з. вследствие устойчивых повреждений (падение деревьев и др.)	3,3	1,0	2,7	0,65	0,1	0,14
6	разрыв передачи вследствие асинхронного хода	-	-	0,02-0,03	0,04-0,05	0,06-0,07	0,05-0,06

В табл.П1.2 указана доля Δ однофазных к.з. в общем числе к.з. Усредненное число отключений шунтирующих реакторов (ШР) можно принять 5-10 за год для подстанций 1150 кВ; 10-20 - для ШР 750 кВ и 20-50 - для ШР 500 кВ.

Таблица П1.2

Доля Δ однофазных к.з. в общем числе к.з.

U_n , кВ	110	220	330	500	750	1150
Δ	0,67	0,84	0,86	0,92	0,95	0,99

В зависимости от логики действия защитных устройств и систем автоматики каждое к.з. вызывает ту или иную серию различных аварийных коммутаций.

Наиболее распространены следующие четыре варианта организации релейной защиты и противоаварийной автоматики:

- на электропередаче нет ни ОАПВ, ни ТАПВ. Любое к.з. вызывает двустороннее отключение аварийного участка всеми тремя фазами, которое распадается на две аварийные коммутации. Первая - это трехфазный разрыв передачи (далее именуется "первичное отключение к.з."), после чего с интервалом, определяемым каскадностью действия линейных выключателей поврежденного участка, происходит вторая аварийная коммутация - отключение ненагруженной линии с короткозамкнутой фазой. В обеих коммутациях перенапряжения воздействуют на изоляцию двух фаз изоляции электропередачи и двух из

трех резисторов каждого комплекта ОПН;

- на электропередаче установлена система ОАПВ. Если на линии произошло многофазное к.з., то действия защит аналогичны предыдущему случаю (отсутствие на передаче ОАПВ и ТАПВ), но воздействия на изоляцию и ограничители либо вообще отсутствуют, либо перенапряжения воздействуют на изоляцию и резисторы ОПН только одной из трех фаз. Если произошло однополюсное к.з., то двусторонне отключается одна поврежденная фаза, при этом перенапряжения не возникают. После бестоковой паузы фаза включается с одной стороны. При успешности ОАПВ перенапряжения воздействуют на изоляцию и ограничители одной из трех фаз. При неуспешности ОАПВ следуют две аварийные коммутации: трехфазный разрыв передачи (далее именуется "вторичное отключение к.з.") и отключение ненагруженной линии с одной короткозамкнутой фазой. Воздействия на изоляцию аналогичны предыдущему случаю (отсутствие ОАПВ и ТАПВ);

- на электропередаче установлена система ТАПВ. Вначале происходят две аварийные коммутации - первичное отключение к.з. и отключение ненагруженной линии с одной или двумя короткозамкнутыми фазами. В этих коммутациях воздействия на изоляцию аналогичны тем, что возникают в случае отсутствия ОАПВ и ТАПВ. Затем после бестоковой паузы аварийный участок подключается с одной стороны. Если ТАПВ было успешным, то перенапряжения воздействуют на изоляцию и резисторы ОПН всех трех фаз. Если ТАПВ неуспешно, то возникают еще две аварийные коммутации: неуспешное ТАПВ и затем отключение линии с одной короткозамкнутой фазой. В обеих коммутациях перенапряжения при однополюсном к.з. воздействуют на изоляцию фаза-земля двух или трех фаз или при двухполюсном к.з. на землю - только одной из трех фаз;

- на электропередаче имеется как система ОАПВ, так и система ТАПВ. Если произошло многофазное к.з., то воздействия аналогичны таковым на передаче, где есть только ТАПВ. Если произошло однофазное к.з., то работает система ОАПВ и сначала двусторонне отключается только одна короткозамкнутая фаза и воздействия на изоляцию и ограничители не возникают. Если после бестоковой паузы ОАПВ успешно, то воздействия аналогичны тем, что имеют место на передаче, оборудованной только системой ОАПВ. Если ОАПВ неуспешно, то вступает в действие ТАПВ, при этом воздействия аналогичны тем, что имеют место на передаче, оборудованной только системой ТАПВ.

В табл.П1.3 приведены составленные с учетом изложенного формулы для оценки числа внутренних перенапряжений.

Таблица П1.3

Усредненное число ожидаемых воздействий за год N_s внутренних перенапряжений

S	N_s	Коммутация	Система АПВ на передаче	Ожидаемое число коммутаций	Ожидаемое число N_s воздействий за год		
					на изоляцию		На резисторы ОПН
					Фаза-земля	Фаза-фаза	
1	N_1	Плановое	любая	n_1	N_1	N_1	N_1

		включение						
2	N_2	Плановое отключение	любая	n_2		N_2	N_2	N_2
3	N_3	Трехфазный разрыв передачи при отключении первичного к.з.	отсутствует	$n_3 + n_4 + n_5$		$\frac{2}{3} N_3$	N_3	$\frac{2}{3} N_3$
			ОАПВ	$(1 - \Delta)(n_3 + n_4 + n_5)$		$\frac{2}{3} N_3$	0	$\frac{2}{3} N_3$
			ТАПВ	$n_3 + n_4 + n_5$		$\frac{2}{3} N_3$	N_3	$\frac{2}{3} N_3$
			ОАПВ и ТАПВ	$(1 - \Delta)(n_3 + n_4 + n_5)$		$\frac{2}{3} N_3$	N_3	$\frac{2}{3} N_3$
4	N_4	Успешное ОАПВ	ОАПВ	$0,75\Delta(n_3 + n_4)$		$\frac{1}{3} N_4$	$\frac{1}{3} N_4$	$\frac{1}{3} N_4$
			ОАПВ и ТАПВ	$0,75\Delta(n_3 + n_4)$		$\frac{1}{3} N_4$	$\frac{1}{3} N_4$	$\frac{1}{3} N_4$
5	N_5	Успешное ТАПВ	ТАПВ	$(0,15\Delta + 0,6)(n_3 + n_4)$		N_5	N_5	N_5
			ОАПВ и ТАПВ	$0,6(1 - 0,75\Delta)(n_3 + n_4)$		N_5	N_5	N_5
6	N_6	Неуспешное ТАПВ	ТАПВ	$0,4(1 - 0,75\Delta)(n_3 + n_4) + n_5$		$\frac{2}{3} N_6$	$\frac{2}{3} N_6$	$\frac{2}{3} N_6$
			ОАПВ и ТАПВ	$0,4(1 - 0,75\Delta)(n_3 + n_4) + n_5$		$\frac{2}{3} N_6$	$\frac{2}{3} N_6$	$\frac{2}{3} N_6$
7	N_7	Трехфазный разрыв передачи при отключении вторичного к.з.	ОАПВ	$0,25\Delta(n_3 + n_4) + n_5$		$\frac{2}{3} N_7$	$\frac{1}{3} N_7$	$\frac{1}{3} N_7$
			ОАПВ и ТАПВ	$0,4(1 - 0,75\Delta)(n_3 + n_4) + n_5$		$\frac{2}{3} N_7$	$\frac{1}{3} N_7$	$\frac{1}{3} N_7$
8	N_8	Отключение линии короткозамкнутой фазой	Любая	$n_2 + n_4 + n_5$		$\frac{2}{3} N_8$	$\frac{1}{3} N_8$	$\frac{1}{3} N_8$

9	N_9	Разрыв передачи при асинхронном ходе	Любая	n_6	N_9	N_9	N_9
---	-------	--------------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------

Примечания: 1) значения n_1 ; n_2 ; ...; n_6 см. в табл.П1.1;

2) Δ - доля однофазных аварий по отношению к общему числу к.з.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ РЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕР ЗАЩИТЫ ОТ НИХ

2.1. Вынужденное напряжение переходного процесса перенапряжений частоты 50 Гц в симметричном режиме

Расчетная схема для определения вынужденного напряжения в симметричном и несимметричном, при однополюсном к.з., режимах одностороннего питания в электропередачах 110, 220 и 330 кВ при всех коммутациях, кроме успешного ОАПВ, показана на рис.П2.1, а. На рис.П2.1, б показана расчетная схема для определения симметричного и несимметричного вынужденного напряжения в тех же коммутациях для электропередач 500, 750 и 1150 кВ.

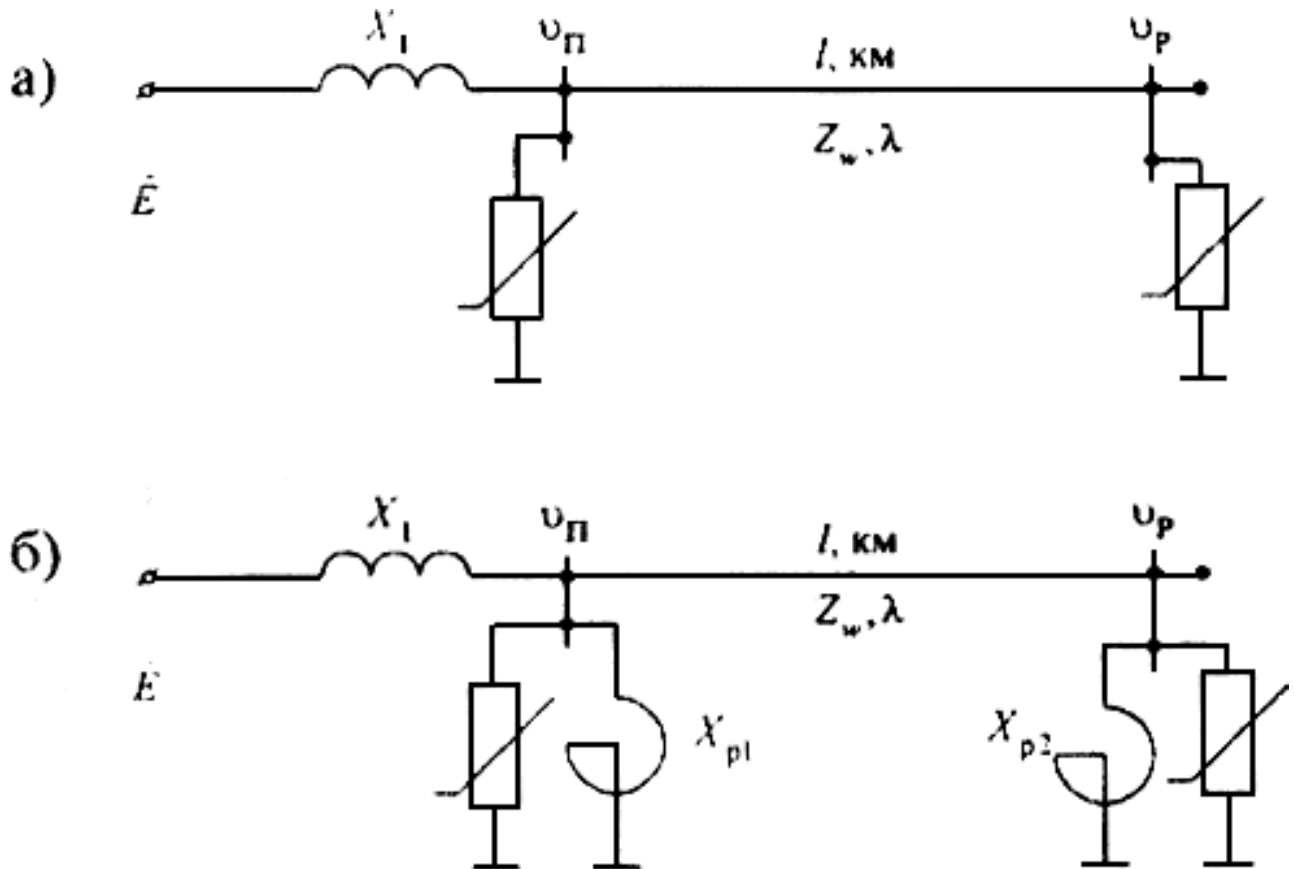


Рис.П2.1. Расчетные схемы для определения вынужденного напряжения во всех коммутациях, кроме успешного ОАПВ

Значения $X_1 = X'_d + X_{тр}$; Z_W и $\lambda^{(1)}$ см. в табл.П2.1, П2.2

Для схемы на рис.П2.1, а вынужденное в симметричном режиме напряжение U_{pe} и U_{ne} соответственно на разомкнутом и питающем концах равно:

$$U_{pe} = E \frac{\cos \varphi_1}{\cos(\lambda^{(1)} + \varphi_1)}; U_{ne} = U_{pe} \cos \lambda^{(1)}; \varphi_1 = \arctg(X_1 / Z_W). \quad (П2.1)$$

Для схемы рис.П2.1, б вынужденное напряжение вычисляется так:

$$U_{pe} = E \frac{\cos \varphi_P}{\cos(\lambda^{(1)} + \varphi_P)} \frac{X_P}{X_1 + X_P}; U_{ne} = U_{pe} \cos \lambda^{(1)}, \quad (П2.2a)$$

где

$$X_P = \frac{X_{P1} X_{P2}}{X_{P1} + X_{P2}}; \quad \operatorname{tg} \varphi_P = \frac{X_{P1} X_{P2} X_1 - (X_{P1} + X_1) Z_W^2}{Z_W X_{P1} X_{P2}}; \quad (П2.2б)$$

причем все величины, входящие в формулы (П2.1), (П2.2a) и (П2.2б), определяются по параметрам прямой последовательности. Индекс "е" внизу букв U_{pe} и U_{ne} указывает, что они рассчитаны без учета насыщения.

По формулам (П2.1) или (П2.2a) и (П2.2б) при заданных длине и конструкции фазы ВЛ, минимальном $X_{1\min}$ и максимальном $X_{1\max}$ возможных значениях в течение года предвключенной реактивности, а также усредненных (см. табл.1.5 Раздела 1) в течение года изменений модулей векторов э.д.с. $E = E_{\min}$ и $E = E_{\max}$, конкретной передачи, определяются минимальные U_{ne1} и U_{ne2} ненасыщенные значения вынужденного напряжения на питающем конце электропередачи.

Если $U_{ne2} \leq 1,15$, то учитывать насыщение не нужно, положив в формулах (П2.1) или (П2.2a) $U_{pe1} = U_1$ и $U_{pe2} = U_1$. Учет насыщения необходим, если U_{pe2} превосходит 1,15.

Учет насыщения производится следующим образом. Вычисляются два значения вспомогательного безразмерного параметра η_1 и η_2 , равные:

для схемы на рис.П2.1, а

$$\eta_1 = \frac{X_{1\min} \cos \varphi_1 \cos \lambda^{(1)}}{Z_{баз} \cos(\lambda^{(1)} - \varphi_1)}, \quad \varphi_1 = \arctg\left(\frac{X_{1\min}}{Z_{баз}}\right), \quad (П2.3a)$$

$$\eta_2 = \frac{X_{1\max} \cos \varphi_1 \cos \lambda^{(1)}}{Z_{баз} \cos(\lambda^{(1)} - \varphi_1)}, \quad \varphi_2 = \arctg\left(\frac{X_{1\max}}{Z_W}\right);$$

для схемы на рис.П2.1, б

$$\eta_1 = \frac{X_{P\min} \operatorname{tg} (\lambda^{(1)} + \varphi_2)}{X_{P\min} \operatorname{tg} \varphi_2 + Z_{\text{баз}} \operatorname{tg} (\lambda^{(1)} + \varphi_2)}, \quad X_{P\min} = \frac{X_{P1} X_{1\min}}{X_{P1} + X_{1\min}}, \quad (\text{П2.3б})$$

$$\eta_2 = \frac{X_{P\max} \operatorname{tg} (\lambda^{(1)} + \varphi_2)}{X_{P\max} \operatorname{tg} \varphi_2 + Z_{\text{баз}} \operatorname{tg} (\lambda^{(1)} + \varphi_2)}, \quad X_{P\max} = \frac{X_{P1} X_{1\max}}{X_{P1} + X_{1\max}},$$

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \left(\frac{X_{P2}}{Z_W} \right). \quad (\text{П2.3в})$$

Входящие в формулы (П2.3а), (П2.3б) и (П2.3в) $Z_{\text{баз}}$ определяются формулами (2.2в)

Раздела 2. Численные значения Z_W и $\lambda^{(1)}$ приведены в табл.П2.4.

По кривым рис.П2.2 (силовые трансформаторы, характеристика N 1) или рис.П2.3 (автотрансформаторы, характеристика N 2) определяют нижнее $v_{\pi 1} = v_{\pi 1}(\eta_1, v_{\text{пе}1})$ и верхнее $v_{\pi 2} = v_{\pi 2}(\eta_2, v_{\text{пе}2})$ значения пределов интервала случайных годовых колебаний насыщенного значения вынужденного напряжения на питающем конце. Затем по формулам (П2.4) определяют минимальное v_1 и максимальное v_2 значения интервала случайных годовых колебаний насыщенного значения вынужденного напряжения на разомкнутом конце передачи:

$$v_1 = v_{\pi 1} / \cos \lambda^{(1)}; \quad v_2 = v_{\pi 2} / \cos \lambda^{(1)}. \quad (\text{П2.4})$$

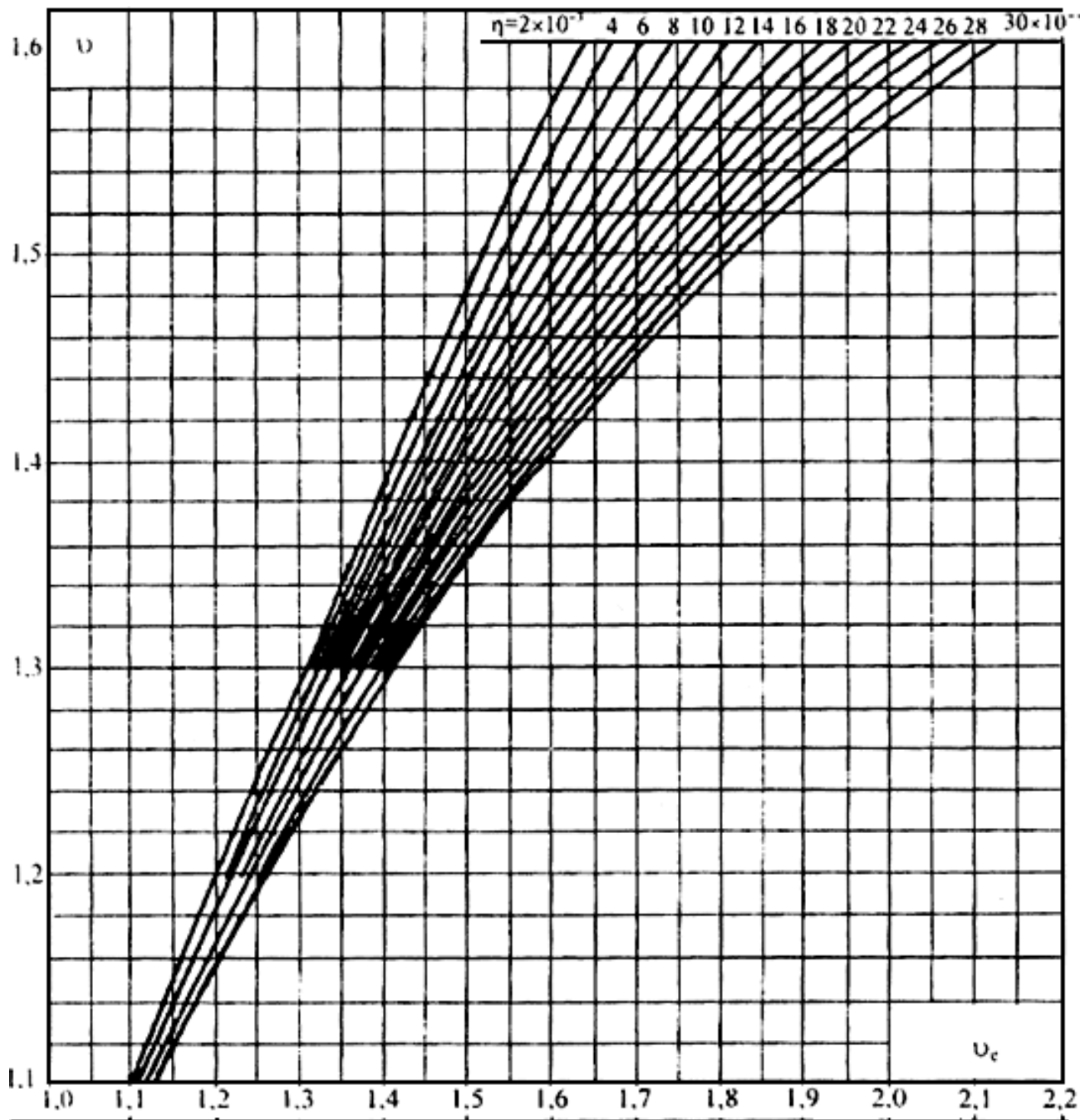


Рис.П2.2. Зависимость насыщенного значения вынужденного напряжения U от его ненасыщенного значения U_e и параметра η . Силовые трансформаторы, характеристика намагничивания N

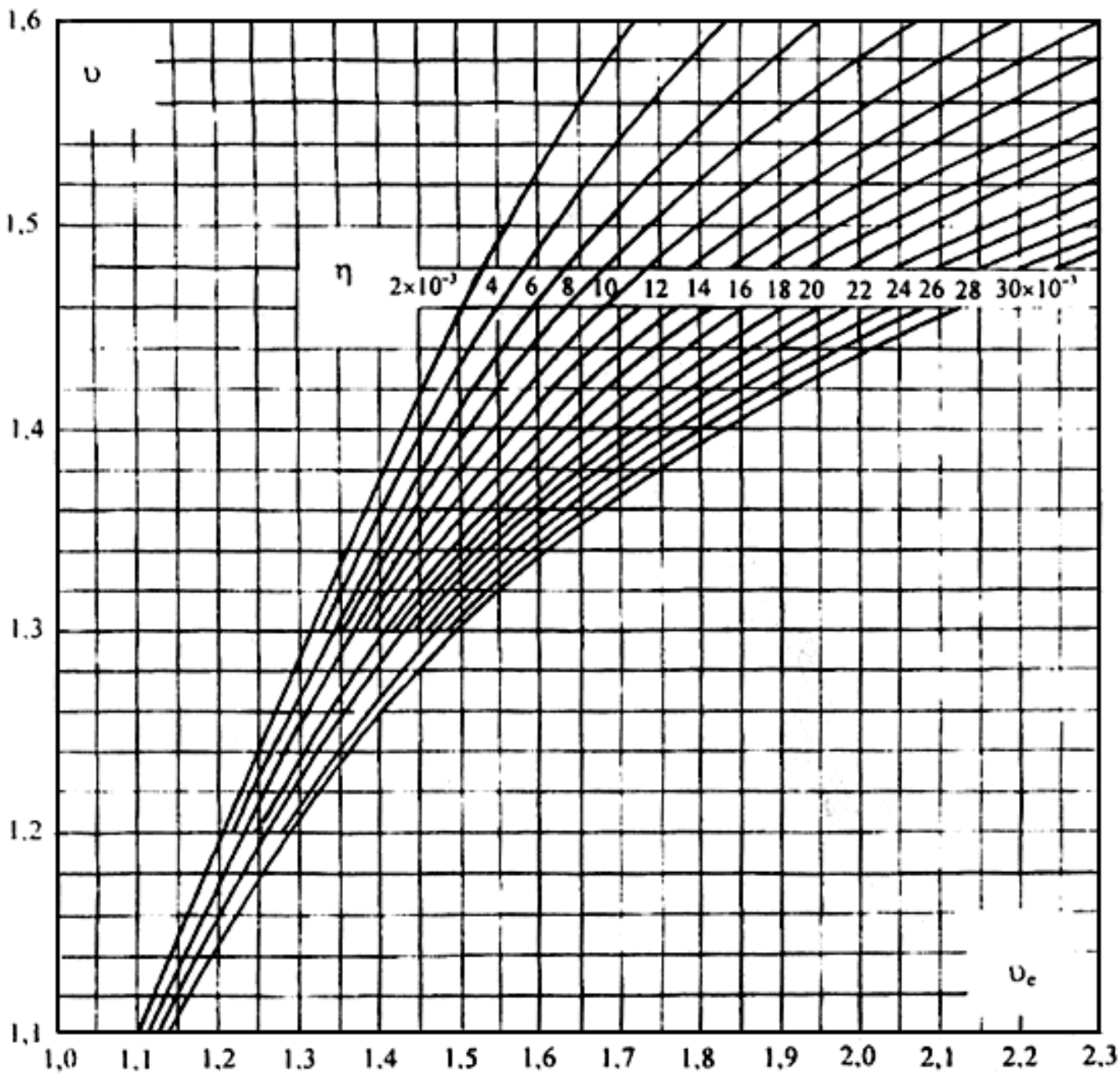


Рис.П2.3. Зависимость насыщенного значения вынужденного напряжения v от его ненасыщенного

значения v_e и параметра η . Силовые автотрансформаторы, характеристика намагничивания N 2

Математическое ожидание \bar{v}_p и дисперсия σ_{vp}^2 вынужденного напряжения в симметричном режиме частоты 50 Гц на разомкнутом конце передачи вычисляется так:

$$\bar{v}_p = \frac{v_1 v_2}{v_2 - v_1} \ln \frac{v_2}{v_1}, \quad (П2.5a)$$

$$\sigma_{v_p}^2 = v_1 \frac{v_2}{v_2 - v_1} \left[(v_2 - v_1) \left(1 + \frac{\bar{v}^2}{v_1 v_2} - 2 \bar{v} \ln \frac{v_2}{v_1} \right) \right] \quad (\text{П2.56})$$

Необходимые для расчетов по формулам (П2.1), (П2.2а) и (П2.2б) численные значения Z_w , $\lambda^{(1)}$ и X_P указаны в табл.П2.1, П2.2 и на рис.П2.1.

Таблица П2.1

Численные значения Z_w ; X_P и R_P реакторов типа РОДЦ

U_n , кВ	110	220	330	500	750	1150
Z_w , Ом	385	405	305	283	265	252
X_P , Ом	-			1530	1880	1600
R_P , Ом	-			6,0	6,0	5,3

По формуле

$$P_v(v_P \leq v_2) = \frac{v_1}{v_2 - v_1} \frac{v_2 - v_P}{v_P} \quad (\text{П2.6})$$

определяется оценка вероятности того, что в симметричном режиме вынужденное напряжение v_P частоты 50 Гц на разомкнутом конце передачи не превзойдет своего максимального значения в годовом интервале случайных изменений v_2 .

Из (П2.6) следует, что распределение $P_v(v_P \leq v_2)$ - это семейство кривых с параметрами v_1 и v_2 .

2.2. Вынужденное напряжение частоты 50 Гц

в несимметричном режиме однополюсного к.з.

В несимметричном режиме однополюсного к.з. максимальная и минимальная величины ненасыщенного значения вынужденного напряжения частоты 50 Гц v_{epk} и v_{epk} соответственно на разомкнутом и питающем концах передачи определяются по формулам:

$$v_{epk} = v_{ep2} h_{k2}, \quad v_{epk} = v_{ep1} h_{k1}, \quad (\text{П2.7})$$

где v_{ep} и v_{ep} рассчитывают по формулам (П2.1), (П2.2а) и (П2.2б), а h_{k2} и h_{k1} - значения коэффициента несимметрии $h_{k.z.}$ при однополюсном к.з. в конце и начале ВЛ

соответственно. При этом коэффициент несимметрии $h_{к2}$ равен

$$h_{к2} = 0,5\sqrt{[4 - \varepsilon(1 + \nu_2)(4 + \nu_2)]^2 + 4\varepsilon\nu_0[1 + \varepsilon\nu_0 - \varepsilon(1 + \nu_2)]}, \quad (\text{П2.8})$$

где

$$\varepsilon = \frac{1}{(1 + \nu_0 + \nu_2)}; \quad \nu_0 = \frac{X^{(0)}}{X^{(1)}}; \quad \nu_2 = \frac{X^{(2)}}{X^{(1)}}. \quad (\text{П2.9})$$

$X^{(0)}$, $X^{(1)}$, $X^{(2)}$ - входные сопротивления относительно разомкнутого конца электропередачи, рассчитанные соответственно по параметрам нулевой, обратной и прямой последовательности при закороченных зажимах э.д.с. E (см. рис.П2.1). Для схемы на рис.П2.1, а:

$$\nu_k = \frac{X_1 \cos \lambda + Z_W \sin \lambda}{X^{(1)} \cos \lambda^{(1)} + Z_W \sin \lambda^{(1)}}; \quad (\text{П2.10})$$

для схемы на рис.П2.1, б:

$$\nu_k = \frac{X \cos \lambda + Z_W \sin \lambda}{X^{(1)} \cos \lambda^{(1)} + Z_W \sin \lambda^{(1)}}; \quad X = \frac{X_1 X_{P1}}{X_1 + X_{P1}}. \quad (\text{П2.11})$$

Индекс " k " ($k=1; 2; 0$) при ν указывает на то, что входящие в формулы (П2.10) и (П2.11) величины X_1 , X_{P1} , Z_W и λ рассчитывают по параметрам прямой, обратной и нулевой последовательности.

Численные значения всех величин, входящих в формулы (П2.10) и (П2.11), приведены в табл.П2.1 и табл.П6.2 Приложения 6.

Для схемы на рис.П2.1, а коэффициент $h_{к1}$ получается подстановкой в формулы (П2.8), (П2.9) и (П2.10)

$$\nu_k = X_1 / X_1^{(1)}; \quad (\text{П2.12})$$

а для схемы на рис.П2.1, б - подстановкой в формулы (П2.8), (П2.9) и (П2.11) величины

$$\nu_k = X / X^{(1)}. \quad (\text{П2.13})$$

Математическое ожидание $\bar{u}_{к.з}$ и функцию распределения вероятностей того, что насыщенное значение $u_{к.з}$ вынужденного напряжения в несимметричном режиме однополюсного к.з. не превзойдет своего максимального за год значения $u_{к2}$ определяют по формулам:

$$\bar{v}_{кз} = \frac{v_{к1} v_{к2}}{v_{к2} - v_{к1}} \ln \frac{v_{к2}}{v_{к1}} ; \quad (\text{П2.14а})$$

$$P_{U_x}(v_{кз} \leq v_{к2}) = \frac{v_{к1}}{v_{к2} - v_{к1}} \frac{v_{к1} - v_{кз}}{v_{кз}} . \quad (\text{П2.14б})$$

Численные значения $v_{к1}$ и $v_{к2}$, входящие в состав выражений (П2.14а) и (П2.14б), определяются по формулам (П2.7)-(П2.11) и указаниям, изложенным в предыдущем п.1 Приложения 2, т.е. с использованием формул (П2.3а), (П2.3б) и (П2.3в), а также зависимостей рис.П2.2 или П2.3. Из формулы (П2.14) следует, что зависимость $P_{U_x}(v_{кз})$ есть семейство кривых с параметрами $v_{к1}$ и $v_{к2}$.

2.3. Вынужденное напряжение частоты 50 Гц в несимметричном режиме при успешном ОАПВ

На рис.П2.4, а показана расчетная схема для определения вынужденного напряжения $v_{\text{ОАПВ}}$ в коммутации успешного ОАПВ в электропередачах 220 и 330 кВ. На рис.П2.4, б приведена расчетная схема для определения $v_{\text{ОАПВ}}$ в электропередачах напряжением 500-1150 кВ. Необходимые для расчета численные значения волнового сопротивления, волновой длины и компенсационных реакторов по прямой и нулевой последовательности указаны в табл.П2.2.

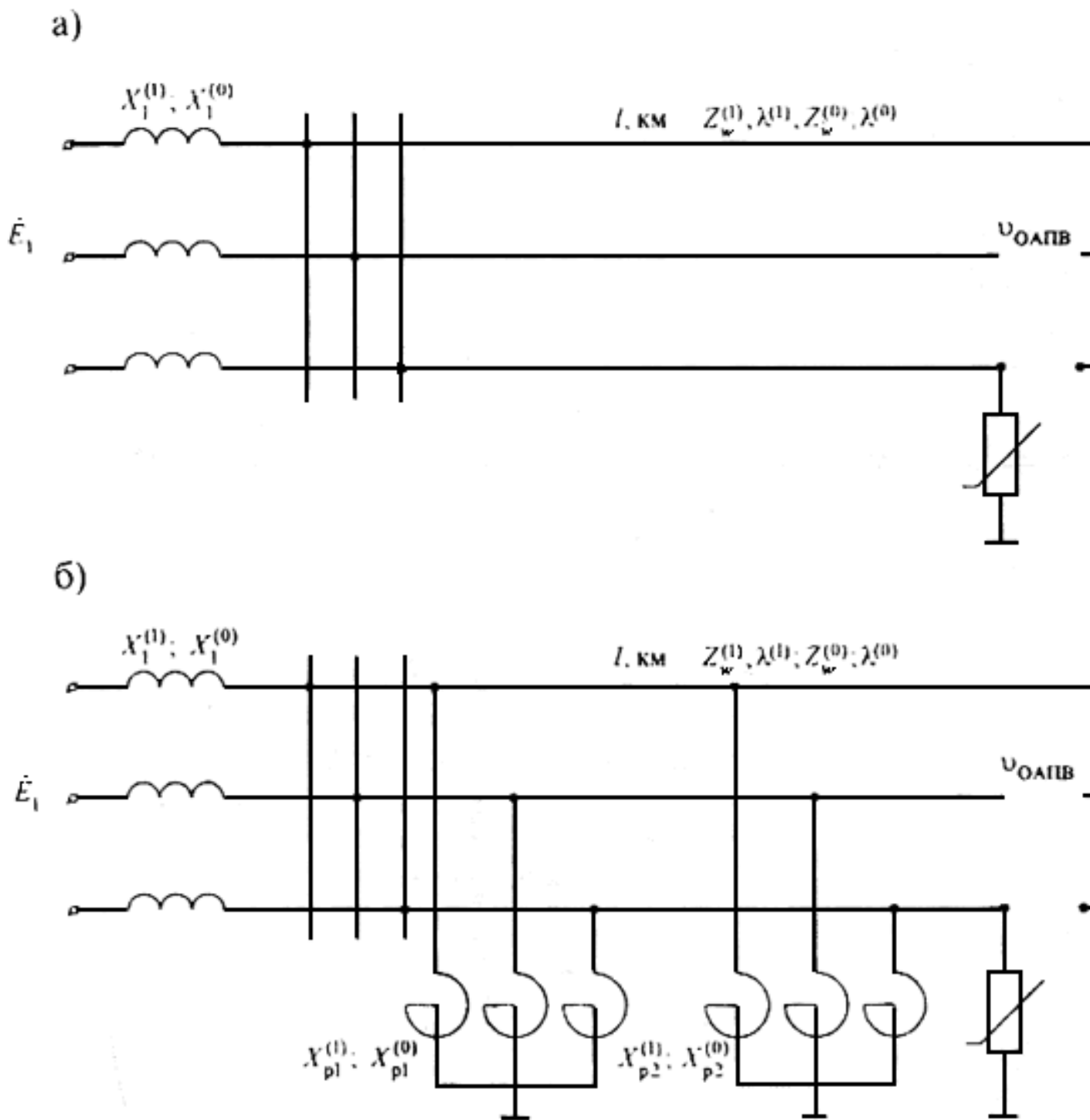


Рис.П2.4. Расчетные схемы для определения вынужденного напряжения в коммутации успешного ОАПВ.

$z_w^{(1)} ; \lambda^{(1)} ; z_w^{(0)} ; \lambda^{(0)}$ - см. в табл.П2.2

Таблица П2.2

Усредненные значения $Z_W ; Z_W^{(0)} ; \lambda^{(1)} ; \lambda^{(0)} ; X_P$

$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	110	220	330	500	750	1150
---------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	------

Z_W , Ом		385	405	305	283	265	252
$Z_W^{(0)}$, Ом		845	785	645	560	485	390
		875	820	675	590	560	520
$\lambda^{(1)} / (10^{-3} l)$, радиан		1,0605	1,0704	1,0704	1,0755	1,0804	1,0835
$\lambda^{(0)} / (10^{-3} l)$, радиан		1,5464	1,5022	1,4902	1,5924	1,309	1,3373
		1,5965	1,6336	1,5341	1,6759	1,7681	1,782
X_P , Ом	схема без X_0	-			1530	1880	1600
	схема с X_0	-			1530+3 X_0	1880+3 X_0	1600+3 X_0

Примечание: для $Z_W^{(0)}$ и $\lambda^{(0)}$ в числителе опоры со сплошными тросами; в знаменателе - с разрезанными тросами.

Расчет $v_{\text{ОАПВ}}$ выполняется по формуле

$$v_{\text{ОАПВ}} = \sqrt{q^2 v_p^2 + (1-q)^2 E_2^2 + 2q(1-q)v_p E_2 \cos \theta}, \quad (\text{П2.15})$$

где

$$q = 1 - \frac{1}{1+m} \left(\frac{1}{1+n_1} - \frac{m}{1+n_0} \right). \quad (\text{П2.16})$$

Для электропередач 220 и 330 кВ (см. расчетную схему на рис.П2.4, а) вспомогательные параметры n_i ($i=0; 1$) и m , входящие в формулу (П2.16), и входящий в формулу (П2.15) угол θ между векторами э.д.с. E_1 и E_2 вычисляются по формуле

$$n_i = \frac{X_2}{Z_W} \text{ctg}(\lambda + \varphi), \quad \varphi = \arctg(X_1 / Z_w), \quad (\text{П2.17})$$

n_1 определяется по параметрам прямой последовательности электропередачи, n_0 - по параметрам нулевой последовательности,

$$m = \frac{(X_2 + Z_W \operatorname{tg}(\lambda + \varphi))^{(0)}}{(X_2 + Z_W \operatorname{tg}(\lambda + \varphi))^{(1)}} \quad (\text{П2.18})$$

В последней формуле индексы (1) и (0) вверху квадратной скобки указывают на то, что соответствующая величина рассчитывается по параметрам прямой или нулевой последовательности электропередачи.

Угол θ в формуле (П2.15) находят по формуле:

$$\theta \approx \pm 5,7 + [1 + (0,14 + 0,17)t_{\text{ОАПВ}}] \arcsin \left(\frac{PU_{\text{н}}^2}{P_{\text{нат}} v_p E_2} \frac{X_2 \cos(\lambda + \varphi) + Z_W \sin(\lambda + \varphi)}{Z_W \cos \varphi} \right) \quad (\text{П2.19})$$

Усредненные численные значения отношения $P / P_{\text{нат}}$, входящего в формулу (П2.19), приведены в табл.П2.3.

Таблица П2.3

Усредненные значения $P / P_{\text{нат}}$

$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	110	220	330	500	750	1150
$P / P_{\text{нат}}$	0,7	0,65	0,85	0,75	0,8	0,7

Для электропередач 500, 750 и 1150 кВ (см. расчетную схему рис.П2.4б) вспомогательные параметры n_i ($i=0; 1$) и m , входящие в формулы (П2.16), и входящий в формулу (П2.15) угол θ между векторами э.д.с. E_1 и E_2 равны

$$n_1 = \frac{X_2 \cos \varphi \cos(\lambda - \varphi_p)}{X \cos \varphi_p \cos(\lambda - \varphi)}$$

$$X_p = \frac{X_{p1} X_{p2}}{X_{p1} + X_{p2}};$$

где:

$$\varphi_p = \operatorname{arctg} \left(\frac{Z_W^2 - X_1 X_p}{Z_W (X_1 + X_p)} \right); \quad (\text{П2.20})$$

$$X = \frac{X_1 X_{p1}}{X_1 + X_{p1}}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{Z_W}{X_1} \right);$$

n_1 вычисляется по параметрам прямой последовательности электропередачи; n_0 - по параметрам нулевой последовательности,

$$m = \frac{\left(\frac{X_2(1+n_0)}{n_0} \right)^{(0)}}{\left(\frac{X_2(1+n_1)}{n_1} \right)^{(1)}, \quad (\text{П2.21})$$

причем индекс (1) или (0) вверху квадратной скобки указывает, что эта величина рассчитывается соответственно по параметрам прямой или нулевой последовательности;

$$\theta \approx \pm 5,7 + [1 + (0,14 \text{ } 0,17)t_{\text{ОАПВ}}] \times \arcsin \left[\frac{PU_{\text{н}}^2}{P_{\text{нат}} v_p E_2} \frac{X_1 + X_p}{Z_W X} \left(X_2 + X \frac{\cos \varphi_p \cos(\lambda - \varphi)}{\cos \varphi \cos(\lambda - \varphi_p)} \right) \right] \quad * . (\text{П2.22})$$

* Формула соответствует оригиналу. - Примечание "КОДЕКС".

Для каждой конкретной электропередачи известны величины $\lambda^{(1)}$; $\lambda^{(0)}$; $Z_W^{(1)}$; $Z_W^{(0)}$; $X_{p1}^{(1)}$; $X_{p1}^{(0)}$; $X_{p2}^{(1)}$; $X_{p2}^{(0)}$ (см. схемы рис.П2.4). Случайно, но в известных пределах, изменяются в течение года реактивные сопротивления отправной X_1 и приемной X_2 систем как по прямой, так и по нулевой последовательностям, а в пределах от E_{min} до E_{max} - э.д.с. E_1 и E_2 (см. табл.1.5 Раздела 1). С учетом этого статистические характеристики $v_{\text{ОАПВ}}$ определяются следующим образом.

Для линий электропередачи 220 и 330 кВ по формулам (П2.17), (П2.18) и (П2.16) рассчитывают минимальное q_1 и максимальное q_2 . По формуле (П2.19) рассчитывают минимальное θ_1 и максимальное θ_2 значения угла θ :

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &\approx -5,7 + (1 + 0,14t_{\text{ОАПВ}}) \arcsin \frac{PU_{\text{н}}^2}{P_{\text{нат}} v_{p2} E_{2\text{max}}} \frac{X_2 \cos(\lambda + \varphi) + Z_W \sin(\lambda + \varphi)}{Z_W \cos \varphi} \\ \theta_2 &\approx 5,7 + (1 + 0,17t_{\text{ОАПВ}}) \arcsin \frac{PU_{\text{н}}^2}{P_{\text{нат}} v_{p1} E_{2\text{min}}} \frac{X_2 \cos(\lambda + \varphi) + Z_W \sin(\lambda + \varphi)}{Z_W \cos \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (\text{П2.23})$$

В формулах (П2.23) и (П2.24) все величины рассчитываются по параметрам прямой

последовательности электропередачи, $t_{\text{ОАПВ}}$ - длительность бестоковой паузы (с), причем входящие в (П2.23) и (П2.24) U_{p1} и U_{p2} равны соответственно U_1 и U_2 в формулах (П2.4).

Для линий электропередачи 500-1150 кВ минимальное q_1 и максимальное q_2 значение параметра q рассчитывают по формулам (П2.16), (П2.20), (П2.21), а по формулам (П2.22) - минимальное θ_1 и максимальное θ_2 значения угла θ :

$$\theta_1 \approx -5,7 + (1 + 0,14t_{\text{ОАПВ}}) \arcsin \frac{PU_{\text{н}}^2}{P_{\text{нат}} U_{p2} E_{2\text{max}}} \frac{X_1 + X_p}{X_p Z_W} \left(X_2 + X \frac{\cos(\lambda - \varphi) \cos \varphi_1}{\cos(\lambda - \varphi_p) \cos \varphi} \right)$$

$$\theta_2 \approx 5,7 + (1 + 0,17t_{\text{ОАПВ}}) \arcsin \frac{PU_{\text{н}}^2}{P_{\text{нат}} U_{p1} E_{2\text{max}}} \frac{X_1 + X_p}{X_p Z_W} \left(X_2 + X \frac{\cos(\lambda - \varphi) \cos \varphi_p}{\cos(\lambda - \varphi_p) \cos \varphi} \right)$$

(П2.24)

Затем по формулам (П2.15), (П2.23), (П2.24) рассчитываются минимальное за год значение вынужденного напряжения при успешном ОАПВ $U_{1\text{ОАПВ}}$ и его максимальное значение $U_{2\text{ОАПВ}}$, которые равны:

$$U_{1\text{ОАПВ}} = \sqrt{q_1^2 U_{p1}^2 + (1 - q_2)^2 E_{2\text{min}}^2 + 2q_1(1 - q_2) U_{p1} E_{2\text{min}} \cos \theta_2}$$

$$U_{2\text{ОАПВ}} = \sqrt{q_2^2 U_{p2}^2 + (1 - q_1)^2 E_{2\text{max}}^2 + 2q_2(1 - q_1) U_{p2} E_{2\text{max}} \cos \theta_1}$$

Математическое ожидание $\bar{U}_{\text{ОАПВ}}$ вынужденного напряжения частоты 50 Гц в несимметричном режиме при успешном ОАПВ вычисляется по формуле:

$$\bar{U}_{\text{ОАПВ}} = \frac{U_{1\text{ОАПВ}} U_{2\text{ОАПВ}}}{U_{2\text{ОАПВ}} - U_{1\text{ОАПВ}}} \ln \frac{U_{2\text{ОАПВ}}}{U_{1\text{ОАПВ}}}, \quad (\text{П2.26})$$

а распределение:

$$P_{\text{ОАПВ}}(U_{\text{ОАПВ}} \leq U_{2\text{ОАПВ}}) = N \left[(U_{2\text{ОАПВ}} - U_{1\text{ОАПВ}}) \left(1 - \frac{\bar{U}_{\text{ОАПВ}}^2}{U_{1\text{ОАПВ}} U_{2\text{ОАПВ}}} \right) - 2\bar{U}_{\text{ОАПВ}} \ln \frac{U_{2\text{ОАПВ}}}{U_{1\text{ОАПВ}}} \right]$$

; (П2.27)

где

$$N = \frac{U_{1\text{ОАПВ}} U_{2\text{ОАПВ}}}{U_{2\text{ОАПВ}} - U_{1\text{ОАПВ}}} \quad (\text{П2.28})$$

определяет оценку вероятности того, что в несимметричном режиме успешного ОАПВ вынужденное напряжение частоты 50 Гц $U_{\text{ОАПВ}}$ не превзойдет своего максимального значения в интервале годовых случайных изменений $U_{2\text{ОАПВ}}$.

2.4. Защита от перенапряжений, возникающих в неполнофазных режимах

2.4.1. Исходные положения

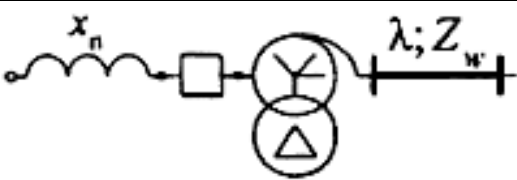
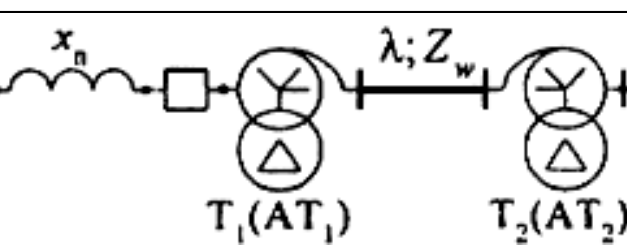
Перенапряжения, возникающие в неполнофазных режимах, имеют резонансный характер. Они могут существовать только в односторонне питаемых блочных или полублочных электропередачах, питаемых от трехобмоточных трансформаторов (автотрансформаторов), третичная обмотка которых замкнута в треугольник. Перенапряжения в неполнофазных режимах возможны при условии, что отрицателен безразмерный параметр

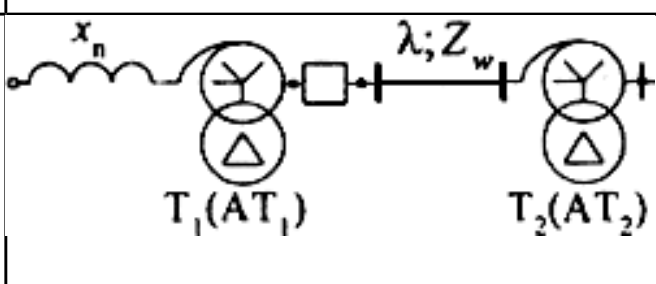
$$m = \frac{1 + \dot{Y}^{(0)} \dot{Z}^{(0)} \dot{Y}^{(1)}}{1 + \dot{Y}^{(1)} \dot{Z}^{(1)} \dot{Y}^{(0)}}, \quad (\text{П2.29})$$

формулы для расчета которого приведены в табл.П2.4.

Таблица П2.4

Однолинейные схемы замещения блочных электропередач и соответствующие им формулы для расчета параметра m

N п п	Схема электропередачи		
		$\dot{Z}^{(1)}$	$\dot{Z}^{(0)}$
1		$jX_{\Pi}^{(1)}$	$jX_{\Pi}^{(0)}$
2		$jX_{\Pi}^{(1)}$	$jX_{\Pi}^{(0)}$

3			
---	---	--	--

Примечания: цифры (1) или (0) сверху буквы указывают на то, что ее величина рассчитывается соответственно по параметрам прямой или нулевой последовательности; цифры "1" или "2" внизу буквы - для T^1 (AT^1) или T^2 (AT^2).



- выключатель, являющийся причиной неполнофазного режима.

При двустороннем питании, отсутствии или разомкнутом треугольнике третичной обмотки перенапряжения неполнофазных режимов невозможны, так как в любом из этих случаев $m^2 > 0$.

Входящие в состав формулы (П2.29) реактивности рассеяния X_{B-C} , X_{C-H} и X_{B-H} рассчитывают по формулам (2.2г) Раздела 2. Параметры эквивалентной трехлучевой схемы замещения трансформатора (автотрансформатора) X_B , X_C и X_H определяют по формулам (2.2д) Раздела 2.

Кратность перенапряжений относительно земли на неотключенной (или недовключенной) фазе без учета потерь на корону с достаточной точностью можно оценить по формуле:

$$k_{Б.К} = \frac{E}{1 + 2m} \left(1 - m + \dot{Y}^{(0)} \frac{\dot{Z}^{(0)} + \dot{Z}^{(1)}}{1 + \dot{Z}^{(1)} \dot{Y}^{(1)}} \right) \quad (\text{П2.30})$$

Учет влияния короны выполняется следующим образом. По кривым рис.П2.5 и данным табл.2.2 Раздела 2 определяется коэффициент Δ_K . Кратность неполнофазных перенапряжений, ограниченная потерями активной мощности на корону, вычисляется по формуле

$$K = \frac{k_{Б.К}}{(1 + \Delta_K)}, \quad (\text{П2.31})$$

2.4.2. Пример расчета

В качестве примера найдем величины перенапряжений при неполнофазном режиме в схеме N 1 при следующих исходных данных (см. табл. П2.4):

ВЛ 330 кВ длиной $l=250$ км с параметрами $Z_W^{(1)}=305$ Ом, $Z_W^{(0)}=645$ Ом,

$\dot{\lambda}^{(1)} = j1,0704/(10^{-3} l)$ радиан, $\dot{\lambda}^{(0)} = j1,4902/(10^{-3} l)$ радиан, начальное
напряжение общей короны $U_0 = 1,12 U_\Phi$.

Питающая система с эквивалентным реактивным сопротивлением

$$\dot{X}_\Pi^{(1)} = j30 \text{ Ом}, \quad \dot{X}_\Pi^{(0)} = j20 \text{ Ом}.$$

Автотрансформатор АТ 330/110/10,5 мощностью $P_H = 250$ МВА и паспортными значениями $e_{к(В-С)} = 10,3\%$, $e_{к(В-Н)} = 34,2\%$, $e_{к(С-Н)} = 22,3\%$.

А. По формулам (2.2г) раздела 2 определяем реактивности рассеяния

$$\dot{X}_{В-С} = j \frac{e_k U_H^2}{100 P_H} = j \frac{10,3 (330 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 250 \cdot 10^6} = j44,87 \text{ Ом},$$

$$\dot{X}_{В-Н} = j \frac{e_k U_H^2}{100 P_H} = j \frac{34,2 (330 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 250 \cdot 10^6} = j97,15 \text{ Ом},$$

$$\dot{X}_{С-Н} = j \frac{e_k U_H^2}{100 P_H} = j \frac{22,3 (330 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 250 \cdot 10^6} = j148,98 \text{ Ом}.$$

Б. По формулам (2.2д) раздела 2 рассчитываем параметры эквивалентной трехлучевой схемы замещения:

$$\dot{X}_В = j0,5[X_{В-Н} + X_{В-С} - X_{С-Н}] = j0,5[97,15 + 44,87 - 148,98] = -j3,48 \text{ Ом};$$

$$\dot{X}_С = j0,5[X_{В-С} + X_{С-Н} - X_{В-Н}] = j0,5[44,87 + 148,98 - 97,15] = j48,35 \text{ Ом};$$

$$\dot{X}_Н = j0,5[X_{С-Н} + X_{В-Н} - X_{В-С}] = j0,5[148,98 + 97,15 - 44,87] = j100,63 \text{ Ом}.$$

В. По формулам для схемы N 1 табл.П2.4 рассчитываем $\dot{Y}^{(1)}$ и $\dot{Y}^{(0)}$:

$$\dot{y}_{ВХ}^{(1)} = j \frac{\text{tg}\lambda^{(1)}}{Z_W^{(1)}} = j \frac{\text{tg}(0,10704 \cdot 2,5)}{305} = j0,9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1};$$

$$\dot{Y}^{(1)} = \frac{\dot{y}_{ВХ}}{1 + \dot{y}_{ВХ} \dot{X}_{В-С}} = j \frac{0,9 \cdot 10^{-3}}{1 - 0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 44,87} = j0,938 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1};$$

$$\dot{y}_{\text{ВХ}}^{(0)} = j \frac{\text{tg}\lambda^{(0)}}{Z_W^{(0)}} = j \frac{\text{tg}(0,14902 \cdot 2,5)}{645} = j0,606 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1};$$

$$\dot{Y}^{(0)} = \frac{1 + \dot{y}_{\text{ВХ}}^{(0)} \dot{X}_{\text{В-Н}}}{\dot{X}_{\text{С-Н}} - \dot{y}_{\text{ВХ}}^{(0)} (\dot{X}_{\text{В}} \dot{X}_{\text{Н}} + \dot{X}_{\text{В}} \dot{X}_{\text{С}} + \dot{X}_{\text{С}} \dot{X}_{\text{Н}})} = -j6,316 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}.$$

Г. По формуле (П2.29) определяем величину безразмерного параметра

$$m = \frac{1 + \dot{Y}^{(0)} \dot{Z}^{(0)}}{1 + \dot{Y}^{(1)} \dot{Z}^{(1)}} \frac{\dot{Y}^{(1)}}{\dot{Y}^{(0)}} = \frac{1 + 6,316 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{1 - 0,938 \cdot 10^{-3} \cdot 30} \frac{0,938}{(-6,316)} = -0,1726$$

и по формуле (П2.30) находим кратность перенапряжений относительно земли на недовключенной фазе без учета влияния короны

$$k_{\text{Б.К}} = \frac{E}{1 + 2m} \left(1 - m + \dot{Y}^{(0)} \frac{\dot{Z}^{(1)} + \dot{Z}^{(0)}}{1 + \dot{Z}^{(1)} \dot{Y}^{(1)}} \right) = \frac{E}{0,6548} \left(1,173 + 6,316 \cdot 10^{-3} \frac{50}{1 - 0,938 \cdot 10^{-3}} \right)$$

По кривой 2 на рис.П2.5 находим величину коэффициента $\Delta_{\text{К}}$, который для $U_0=1,12$ и $k_{\text{Б.К}}=2,29$ равен $\Delta_{\text{К}}=0,14$. По формуле П2.31 находим кратность перенапряжений при неполнофазном режиме

$$k = \frac{k_{\text{Б.К}}}{(1 + \Delta_{\text{К}})} = \frac{2,29 E}{1,14} = 2,01 *$$

* Формула соответствует оригиналу. - Примечание "КОДЕКС".

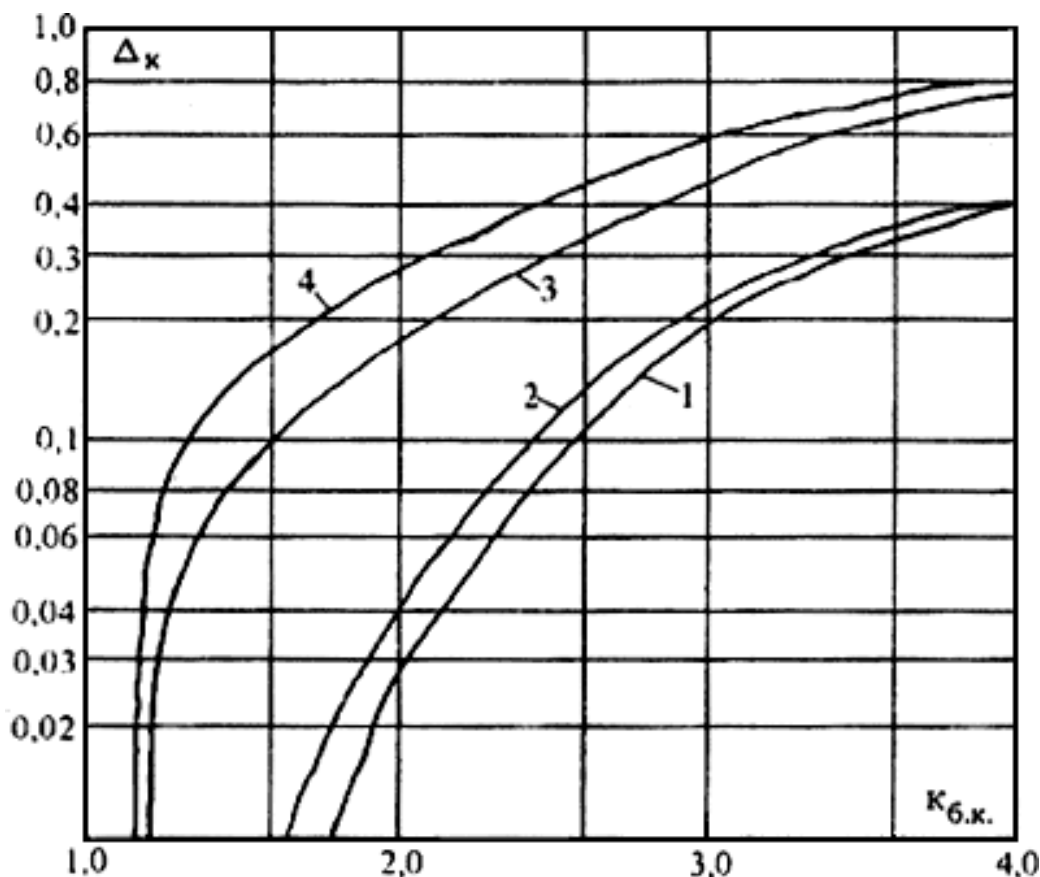


Рис.П2.5. Кратность снижения коронной перенапряжений при неполнофазном резонансе

в зависимости от напряжения начала общей короны U_0

$$1 - 0 \geq m \geq -0,5; 1,2U_{\phi} \leq U_0 \leq 1,4U_{\phi};$$

$$2 - 0 \geq m \geq -0,5; 1,0U_{\phi} \leq U_0 \leq 1,2U_{\phi};$$

$$3 - m < -0,5; 1,2U_{\phi} \leq U_0 \leq 1,4U_{\phi};$$

$$4 - m < 0,5; 1,0U_{\phi} \leq U_0 \leq 1,2U_{\phi}$$

2.4.3. Защита от перенапряжений при неполнофазном резонансе

Защита от перенапряжений при неполнофазном резонансе необходима, если их кратность и длительность воздействия превышают величины, указанные в табл.1.2-1.4 Раздела 1. Так, полученная в примере кратность перенапряжений в режиме неполнофазного резонанса $k=2,01$ допустима, если длительность их воздействия, как видно из табл.1.2 Раздела 1, не превысит 1 с. Наиболее рациональным является отказ от схем, в которых возможно образование односторонне питаемых блочных электропередач. Если такое решение невозможно, например, в ремонтных режимах или в электропередачах 500-1150 кВ с компенсационными реакторами, вынесенными непосредственно на участки ВЛ, т.е. за линейный выключатель, то эффективны следующие релейные защиты или их комбинация:

- защита от повышения напряжения;
- защита от переключения фаз, которая дает команду на отключение двух включенных фаз, когда неполнофазность вызвана отказом при включении выключателем третьей фазы и,

наоборот, дает команду на включение двух отключенных фаз, если неполнофазность вызвана отказом при отключении выключателем третьей фазы.

Полностью снимает проблему перенапряжений при неполнофазном резонансе замыкание электропередачи в транзит выключателем противоположного конца.

2.5. Методы оценки предельной величины перенапряжений при явлениях переходного феррорезонанса и способы защиты от них

Схемы, в которых возможен переходный феррорезонанс, качественно делятся на две группы: слабо демпфированные с наибольшими перенапряжениями и демпфированные с малыми перенапряжениями. Степень демпфирования определяется структурой питающего источника, наличием нагрузки на трансформаторах промежуточных ПС и, в меньшей степени, активным сопротивлением проводов. По структуре источника питания к демпированным схемам относится схема на рис.П2.6, а (схема типа "сборные шины"), к слабо демпфированным - источники питания с выделенным ПТ (схема на рис.П2.6, б) или в виде блока генератор-трансформатор (схема на рис.П2.6, в). В слабо демпфированных схемах длительность перенапряжений переходного феррорезонанса составляет 1,0-1,5 с; в демпфированных - уменьшается до 0,2-0,3 с. В схемах с проходными или отпаечными ПС на коммутируемой линии нагрузка на их понижающих трансформаторах дает заметный демпфирующий эффект даже при значениях, соответствующих минимуму суточного графика нагрузки.

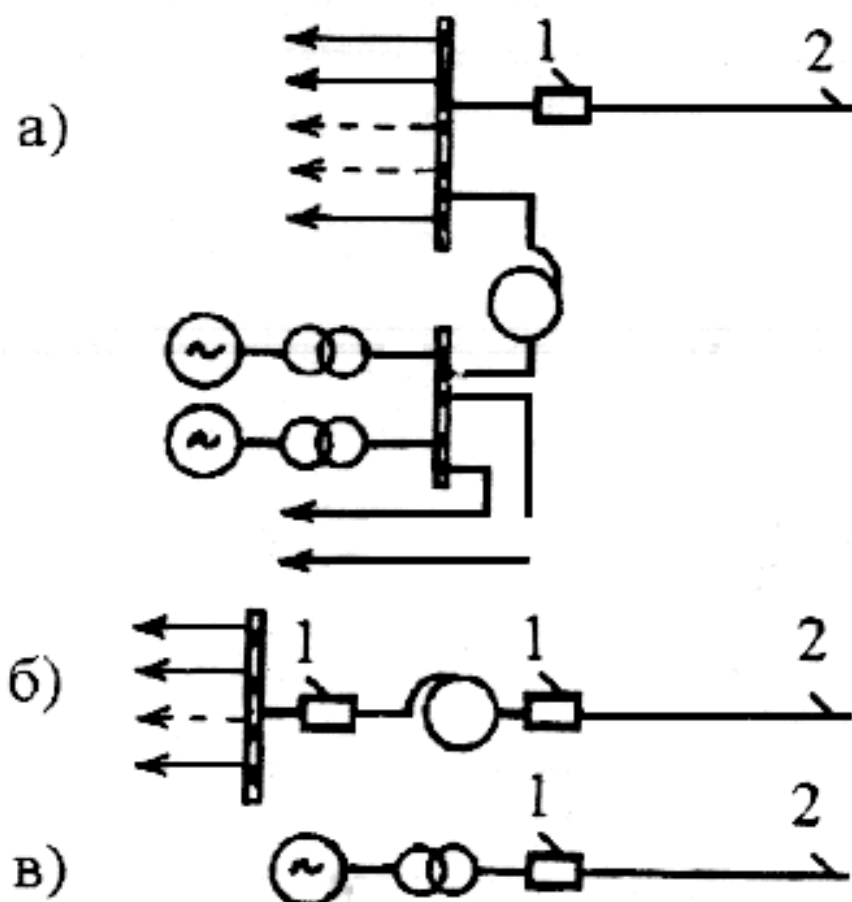


Рис.П.2.6. Принципиальные схемы источника питания

1 - коммутирующий выключатель, 2 - коммутируемая ВЛ

Как исходное значение, так и время затухания аperiodической составляющей потока

$\Phi_0(0)$ и перенапряжения при переходном феррорезонансе на частотах 100 и 200 Гц, подвержены большим разбросам, так как определяются большим числом как независимых, так и связанных между собой, случайных величин. Сюда относятся случайно меняющиеся от коммутации к коммутации и от одной электропередачи к другой угол включения выключателя, годовые колебания предвключенной индуктивности питающего источника, график передачи мощности по ВЛ, амплитуда основной составляющей потока в точке подключения трансформатора и др. Это вынудило представить опытные материалы в виде показанных на рис. П2.7 кривых 1 и 2 верхних огибающих поля точек. Использование этих кривых гарантирует незаниженность оценки k во всем диапазоне $0 \leq P(k) \leq 1$.

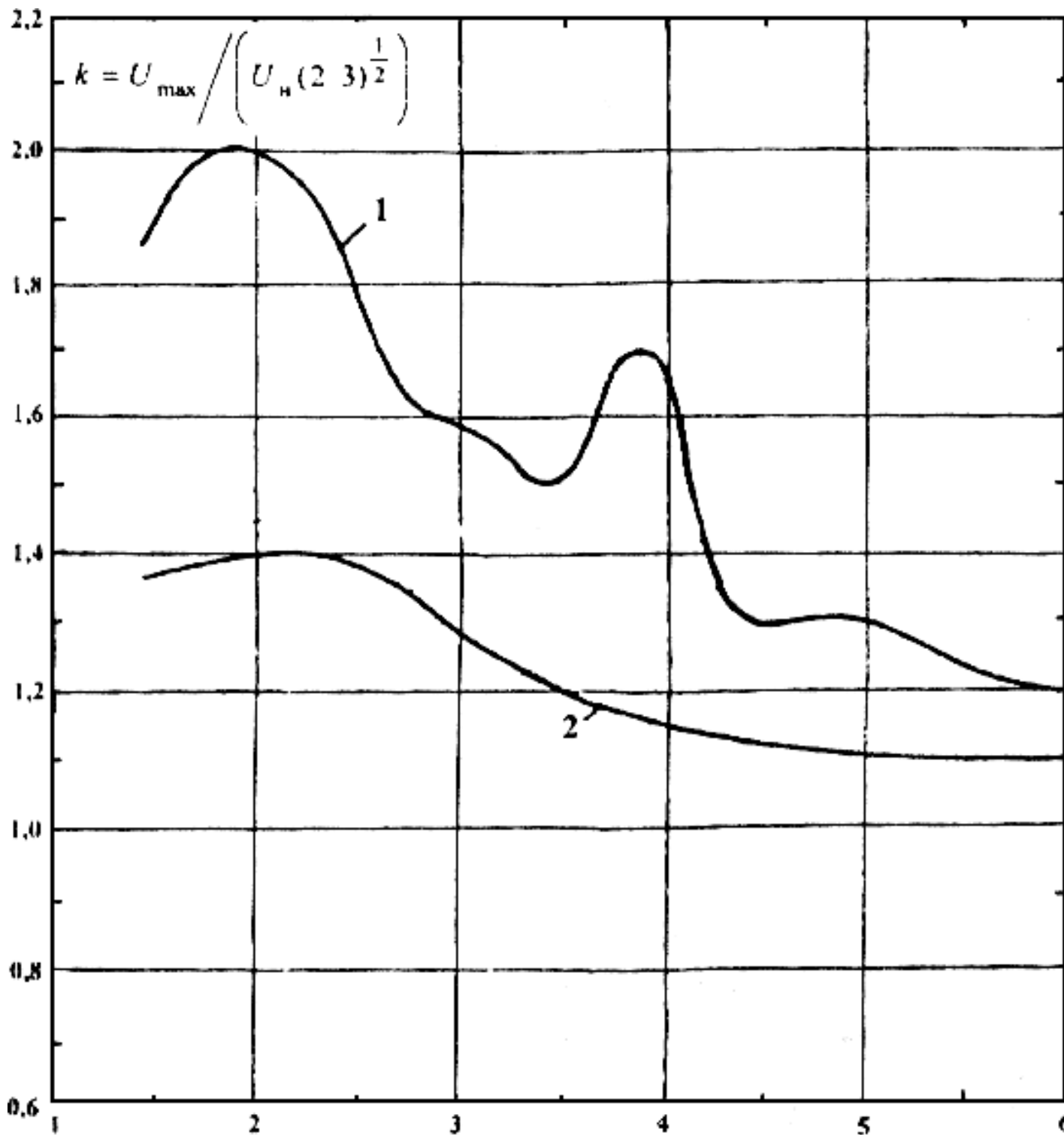


Рис.П2.7. Перенапряжения при переходном феррорезонансе

Верхние огибающие поля экспериментальных данных, полученных в сетях 110-500 кВ (239 реализаций) и на моделях (более 600 реализаций);

1 - слабо демпфированные схемы;

2 - демпфированные схемы

Сопоставление уровней максимальных перенапряжений при переходном феррорезонансе с допустимыми воздействиями показывает, что защита необходима в слабо демпфированных схемах для электропередач 110-500 кВ, если определяемая по номограмме Приложения 3 наименьшая из частот собственных колебаний электропередачи $\beta_k \leq 2,5\omega$, и в передачах 750 кВ, если их собственная частота $\beta_k \leq 4,5\omega$. В передачах 1150 кВ переходный феррорезонанс опасен для слабо демпфированных схем при собственной частоте $\beta_k \leq 5\omega$ и в демпфированных, если собственная частота $\beta_k \leq 3\omega$.

Наименьшая из частот собственных колебаний коммутируемой блочной (полублочной) электропередачи определяется по расчетной схеме вида "источник э.д.с. - предвключенная реактивность - линия с распределенными параметрами". При этом понижающие трансформаторы промежуточных ПС на величину β_k / ω практически не влияют и поэтому учитываться не должны (см. рис.1.1 Раздела 1). Значение эквивалентного индуктивного сопротивления питающего источника X_1 должно определяться с замещением генераторов переходной реактивностью X'_d .

Можно рекомендовать любой из следующих способов защиты перенапряжений при явлениях переходного феррорезонанса:

- эксплуатационными инструкциями запретить как коммутации линии в блоке с невозбужденным трансформатором (автотрансформатором), так и подключение к линии невозбужденного трансформатора или АТ. При необходимости подобных коммутаций трансформатор (или АТ) должен быть предварительно возбужден со стороны обмоток НН или СН, если в этих сетях есть генерирующие источники, либо нагружен местной нагрузкой;

- на стороне низшего напряжения трансформатора или АТ, коммутируемого в блоке с воздушной линией, устанавливается реактор, сигнал на кратковременное подключение которого подается одновременно (или с небольшим упреждением) с командой на включение или отключение выключателей блочной электропередачи. При АПВ подключение реактора осуществляется от действия устройств АПВ. Сигнал на отключение реактора подается от появления тока в обмотке реактора с выдержкой времени $t \geq X / 60R$, где X и R - соответственно активное и реактивное сопротивление низковольтного реактора. Эффективность этого способа защиты иллюстрируется осциллограммами, показанными на рис.П2.8.

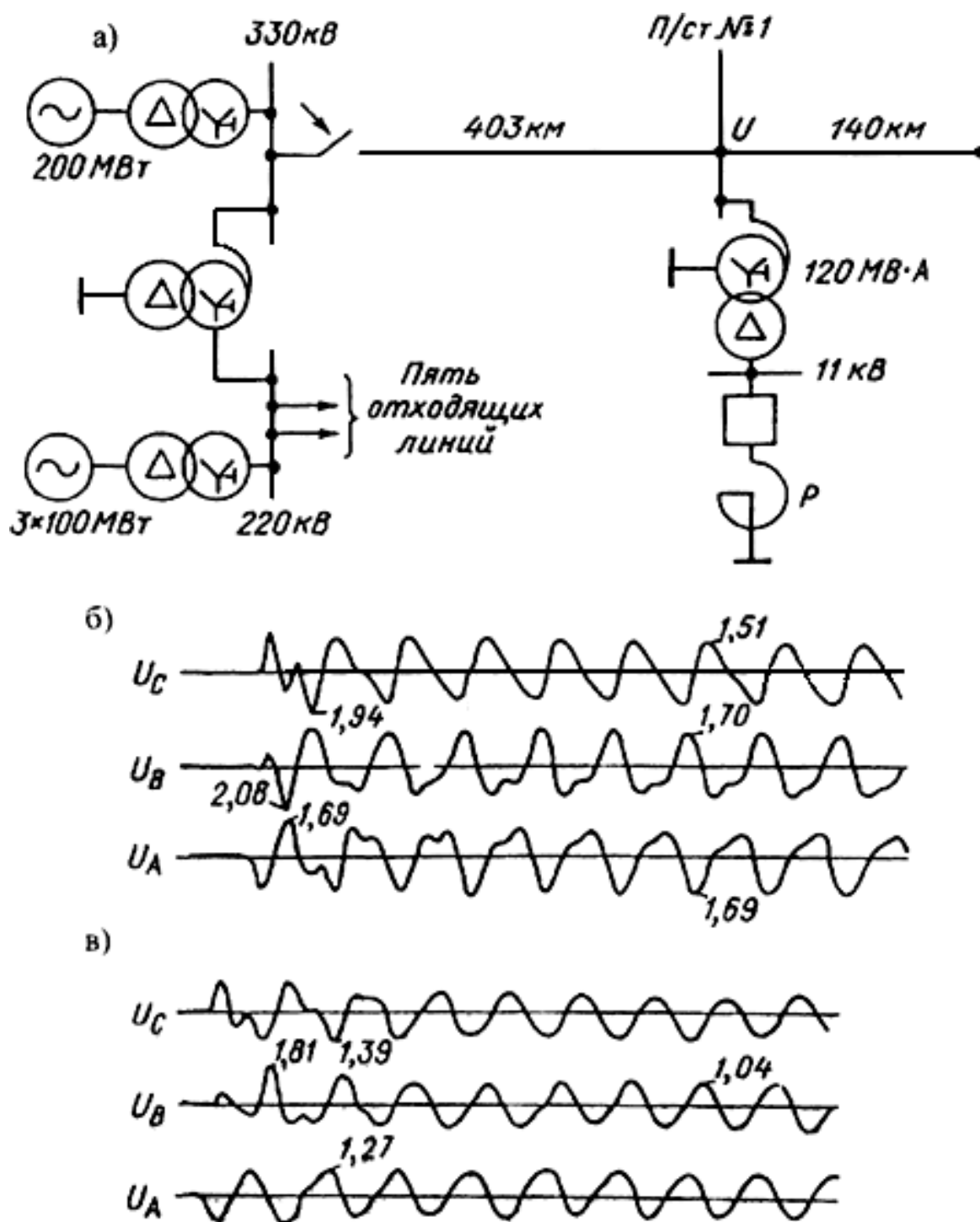


Рис.П2.8. Опытная проверка эффективности защиты от перенапряжений при переходном резонансе с помощью низковольтного реактора:

а - схема опыта; б - реактор отключен; в - реактор подключен

2.6. Автопараметрическое самовозбуждение ультрагармоник четной кратности частоты 100 и 200 Гц

Области, внутри которых возможно автопараметрическое самовозбуждение ультрагармоник 100 и 200 Гц, показаны соответственно на рис.П2.9 и П2.10. Границы областей зависят от трех параметров: насыщенного значения вынужденного напряжения

U_{Π} частоты 50 Гц, воздействующего на шунт намагничивания трансформатора (или АТ) и

эквивалентных квадрата частоты $\beta^2 = a_1 / c$ и затухания $\alpha = 1/2RC$. При этом a_1 характеризует степень нелинейности характеристики намагничивания; величины R и C являются соответственно вещественной и мнимой частью рассчитанного на частоте ультрагармоники комплекса входной проводимости электропередачи, рассматриваемой с зажимов шунта намагничивания трансформатора (или АТ) при закороченных зажимах э.д.с.

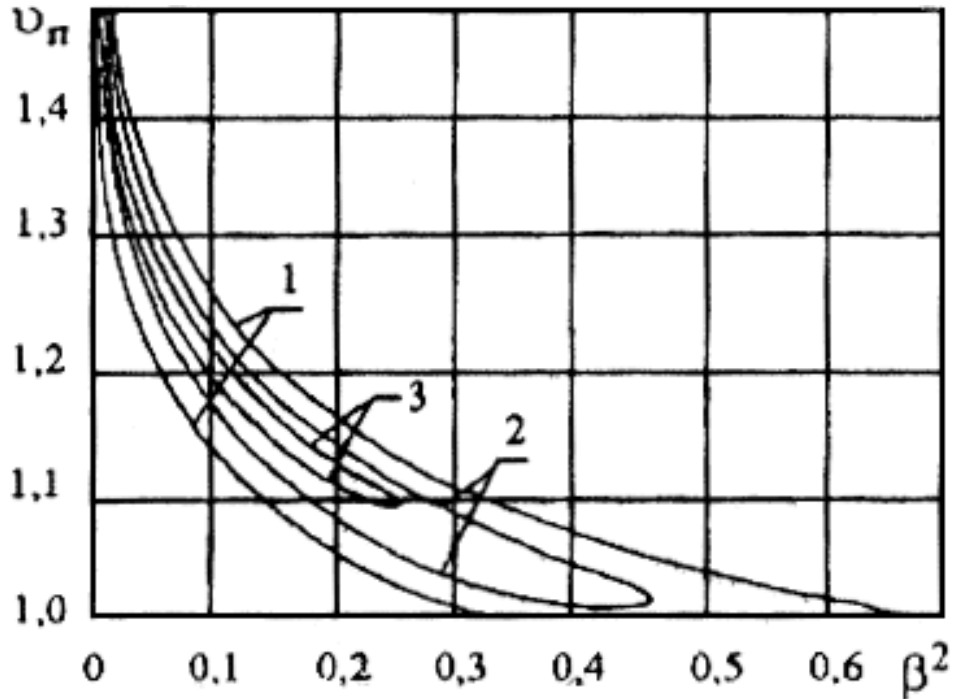


Рис.П2.9. Области автопараметрического самовозбуждения гармоники 100 Гц в электропередачах 500-1150 кВ:

1 - $\alpha = 0$; 2 - $\alpha = 0,5$; 3 - $\alpha = 0,6$; $\alpha_{кр} = 0,707$

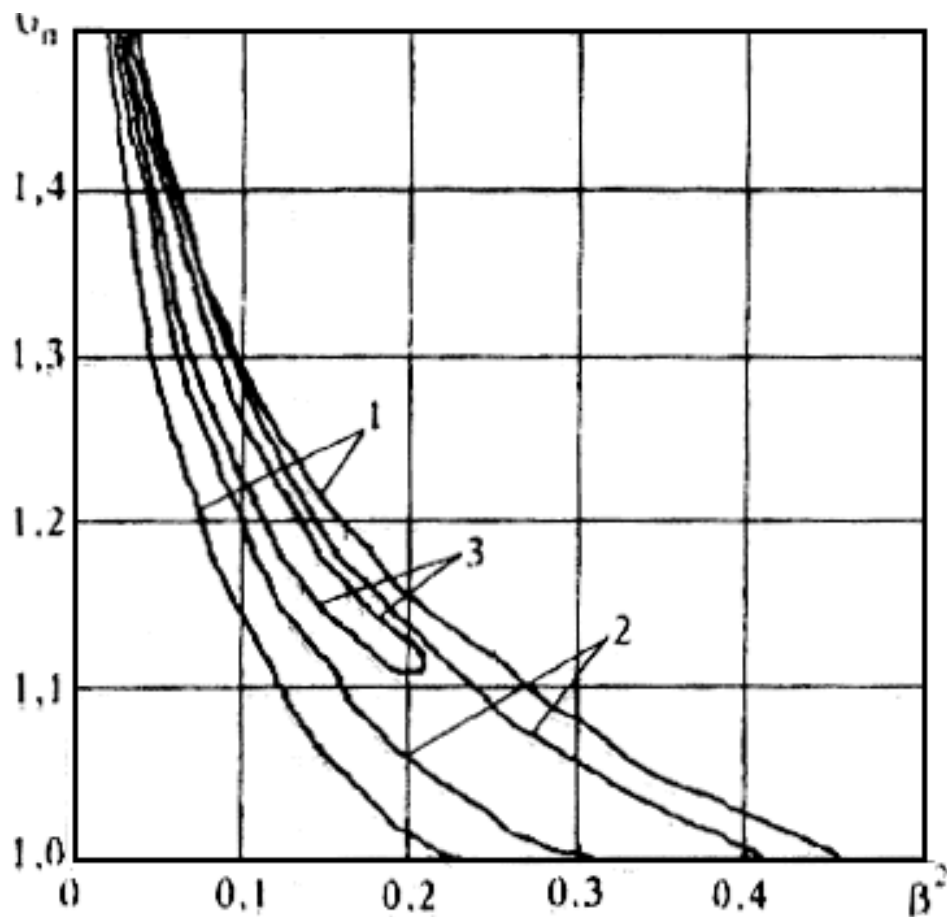


Рис.П2.10. Области автопараметрического самовозбуждения гармоники 200 Гц в электропередачах 500-1150 кВ:

$$1 - \alpha = 0; 2 - \alpha = 0,4; 3 - \alpha = 0,5; \alpha_{кр} = 0,5$$

Зависимости параметров β^2 и α от характеристик электропередачи (l ; Z_W) и реактивного сопротивления источника питания X_1 показаны на рис.П2.11.

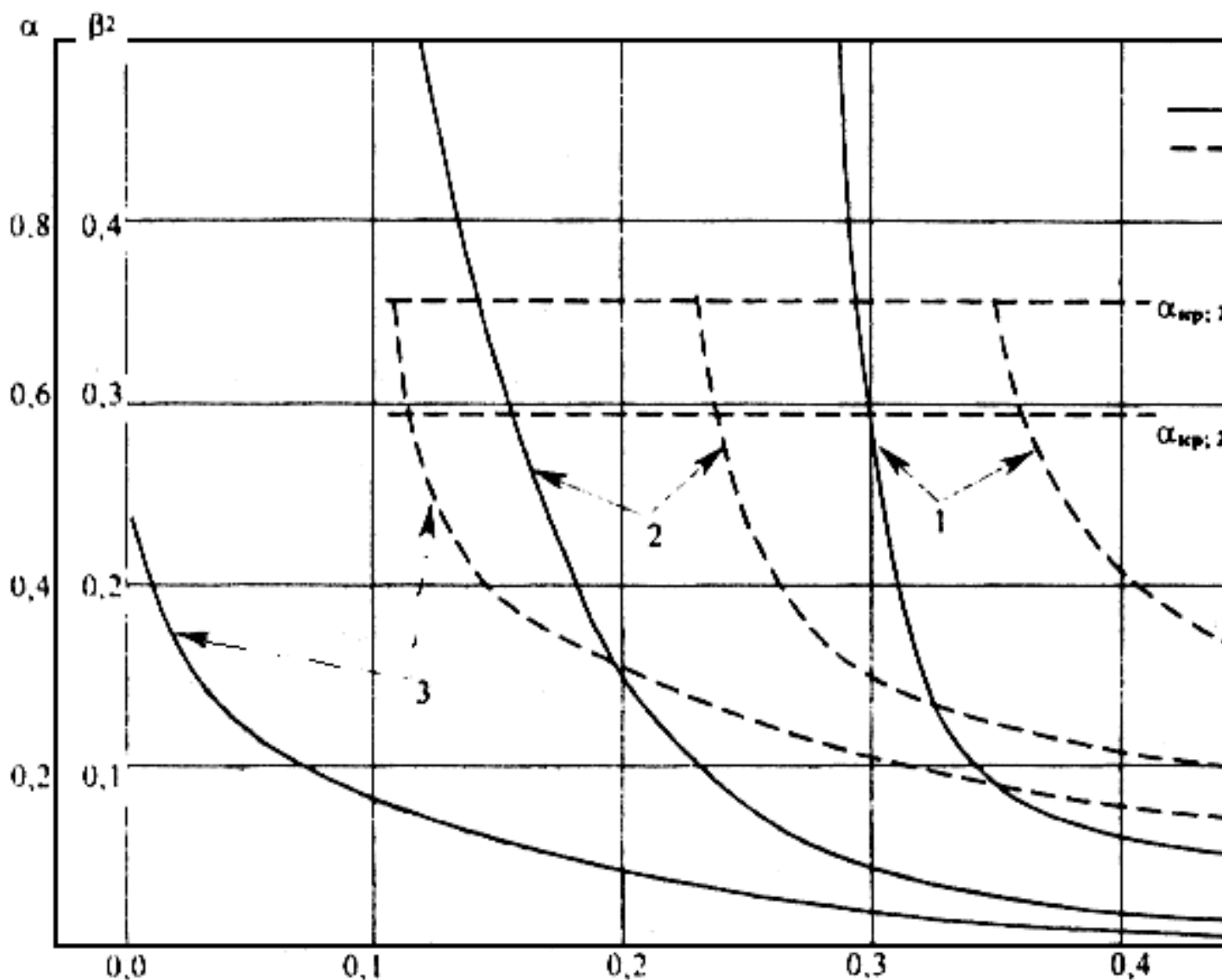


Рис.П2.11. Зависимость параметров α и β^2 от отношения X_1/Z_W (реактивности питающего источника к волновому сопротивлению ВЛ) и длины линии

$$1 - l=500 \text{ км}; 2 - l=600 \text{ км}; 3 - l=700 \text{ км}$$

Чем больше эквивалентное затухание α , тем уже область самовозбуждения ультрагармоники. При так называемом критическом значении $\alpha \geq \alpha_{кр}$ область стягивается в линию и автопараметрическое самовозбуждение ультрагармоники невозможно ни при каких значениях $\nu_{П}$ и β^2 . Для ультрагармоники частоты 100 Гц $\alpha_{кр}=0,707$; для ультрагармоники частоты 200 Гц $\alpha_{кр}=0,58$.

В реальных условиях электропередач 110-330 кВ вероятность автопараметрического самовозбуждения ультрагармоник четной кратности настолько мала, что с этим явлением практически можно не считаться.

Для электропередач 500-1150 кВ расчет возможности автопараметрического самовозбуждения ультрагармоники частоты 100 Гц выполняется следующим образом.

По формулам П2.2а и П2.2б определяется ненасыщенное значение вынужденного

напряжения $U_{пе}$. Необходимые для этих расчетов численные значения Z_W , X_p и X_1 указаны в табл.П2.1, П2.2. По формулам П2.3б и П2.3в вычисляются безразмерные параметры η_1 и η_2 и по зависимостям, показанным на рис.П2.3, определяются минимальное $U_{П1}$ и максимальное $U_{П2}$ случайных за год изменений насыщенного значения параметра $U_{П}$.

По кривым рис.П2.11 для известных характеристик данной конкретной электропередачи находим численные значения параметров β^2 и α .

Самовозбуждение ультрагармоники частоты 100 Гц возможно только в том случае, если для полученной в результате расчета величины параметра β^2 одновременно выполнены два неравенства

$$U_{П1} > \alpha, U_{П2} < \alpha, \quad (П2.31)$$

где $U_{П1}$, $U_{П2}$ и α сопоставляются с границами областей самовозбуждения, показанными на рис.П2.9.

Для электропередач 500-1150 кВ расчет возможности автопараметрического самовозбуждения ультрагармоники частоты 200 Гц выполняется так же и по тем же формулам, что и для ультрагармоники 100 Гц, но минимальное $U_{П1}$ и максимальное $U_{П2}$ насыщенные значения параметра $U_{П}$ определяются по зависимостям, показанным на рис.П2.4.

При этом неравенства (П2.31) должны проверяться применительно к границам областей, показанных на рис.П2.10.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИМЕНЬШЕЙ ИЗ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОММУТИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

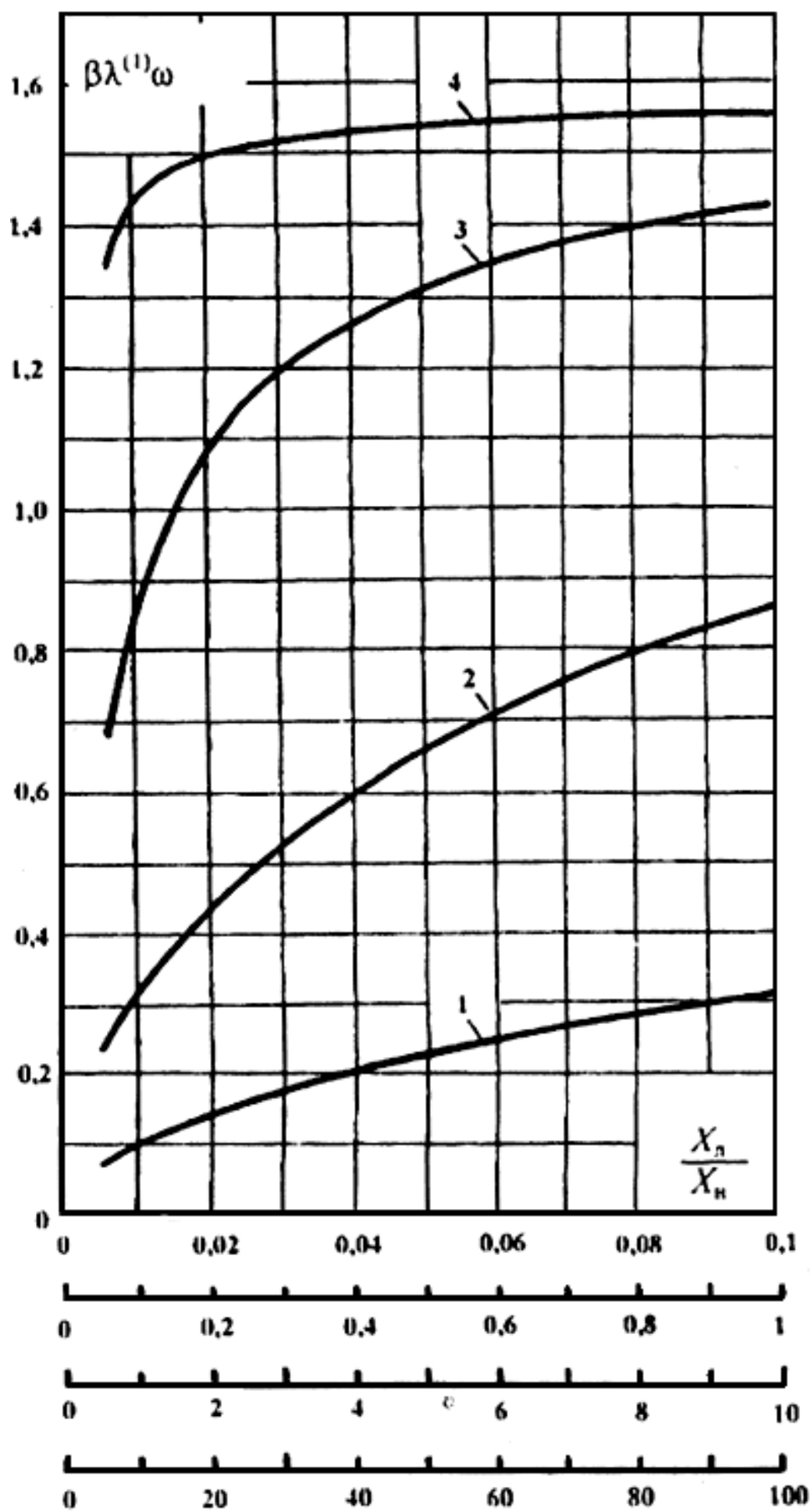


Рис.ПЗ.1. 1 - для $X_{\text{л}} / X_1 = 0,01-0,1$; 2 - для $X_{\text{л}} / X_1 = 0,1-1,0$; 3 - для $X_{\text{л}} / X_1 = 1,0-10$;
 4 - для $X_{\text{л}} / X_1 = 10-100$. $\beta^{(1)}$ - наименьшая собственная частота в долях промышленной частоты;

$\lambda^{(1)}$ - волновая длина линии в радианах (см. табл.П2.1.; табл.П2.2. и рис.П2.1. Приложения 2);

l - длина линии, км; X_1 - сопротивление предвключенной индуктивности на промышленной частоте, Ом;

$X_{\text{л}}$ - индуктивное сопротивление линии, Ом, равно $314 \cdot l \cdot L_{\text{л}}$; ($L_{\text{л}}$ - Гн/км)

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПН, ВЫПУСКАЕМЫХ НПО "ЭЛЕКТРОКЕРАМИКА" (ТАБЛ.П4.1.1-П4.1.4), "АВВ-УЭТМ" (ТАБЛ.П4.2.1-П4.2.5), "ФЕНИКС-88" (ТАБЛ.П4.3.1-П4.3.3), "ТАВРИДА-ЭЛЕКТРИК" (ТАБЛ.П4.1)

В этом Приложении приведены основные электрические характеристики ОПН, серийно выпускаемых в России. Характеристики соответствуют техническим требованиям на защитные аппараты, утвержденным РАО "ЕЭС России". Более подробную информацию об ОПН необходимо запрашивать у фирм-поставщиков.

4.1. Электрические характеристики ОПН, выпускаемых НПО "ЭЛЕКТРОКЕРАМИКА" в фарфоровых покрышках

Данные о выпуске и надежности ОПН 110-750 кВ производства НПО "Электрокерамика" с 1976 по 1998 г.г. (в числителе - общее количество повреждений, в знаменателе - количество повреждений за вычетом случаев нарушения условий эксплуатации и соответствия техническим условиям) приведены в табл.П4.1.1. НПО "Электрокерамика" серийно выпускает также ОПН 0,4-35 кВ.

Таблица П4.1.1

Класс напряжения, кВ	Количество фаз, шт.	Объем эксплуатации, фазо-лет	Количество повреждений	% повреждений на 1 фазу в году
110	4032	20950	9/6	0,043/0,029
150	455	2374	3/1	0,126/0,042
220	2827	15214	8	0,053
330	529	2460	2/1	0,081/0,041
500	1066	6829	10/4	0,161/0,059

750	164	1312	11/6	0,762/0,457
-----	-----	------	------	-------------

Примечание: аналогичные обобщенные данные по ОПН производства "АВВ-УЭТМ", "Феникс-88", "Таврида-Электрик" пока отсутствуют, но могут быть запрошены у соответствующих фирм.

Таблица П4.1.2

Электрические характеристики ОПН 110-1150 кВ

Наименование	ОПН-110 УХЛ1	ОПН-I-110 ХЛ4	ОПН-220 УХЛ1	ОПН-I-220 У1 ОПН-I-220 УХЛ4	ОПН-330 У1	ОПН-500 УХЛ1	ОПН-750 У1	ОПН О-750 У1	ОПН-I-1150 У1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Класс напряжения, кВ	110	110	220	220	330	500	750	750	1150
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	73	73	146	146	210	303	455	455	694
Напряжение на ограничителе, кВ дейст., допустимое в течение времени									
8 ч	81		162		233	336			
3 ч	83		166		239	345			
1 ч	85		171		246	355			765
20 мин	88	88	175	175	250	365	545	545	-
20 с	95	95	190	190	270	390	590	590	830
3,0 с	-	-	-	-	-	-		-	900
3,5 с	100	100	200	200	290	420	635	635	-
1,0 с	105	-	210	-	305	440	660	660	-
0,15 с	112	-	225	-	325	470	705	705	935

0,12 с	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,05 с	-	-	-	-	-	-	-	-	970
Расчетный ток коммутационного перенапряжения, 1,2/2,5 мс, А	280	350	420	500	700	1200	1800	1200	2000
Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационного перенапряжения, кВ, не более	180	175	360	350	520	750	1125	1125	1670
Остающееся напряжение, кВ при импульсном токе с длительностью фронта волны 8 мкс с амплитудой не более									
3000 А	230*	-	430*	-	620*	825	-	-	-
5000 А	250	205	460	410	650	860	1280	1300	-
7000 А	-	-	-	-	-	865	-	-	-
10000 А	280*	-	500*	-	700	920	1320	1350	-
14000 А	-	-	-	-	-	-	-	-	1900
15000 А	-	-	-	-	-	980	1380	1420	-
30000 А	-	-	-	-	-	-	1550*	1600*	-
Пропускная способность:									
20 импульсов тока 1,2/2,5 мс с амплитудой, А	280	350	420	500	630	1200	1800	1450	2000
20 импульсов тока 8/20 мкс с амплитудой, А	5000	5000	5000	5000	-	-	-	-	-
20 импульсов тока 16/40 мкс с амплитудой, А	-	-	-	-	8000	15000	15000	15000	20000
2 импульса тока 8/20 мкс с	15000	-	15000	-	24000	30000	40000	30000	40000

амплитудой, А									
Взрывобезопасность при токах к.з.:									
0,2 с, кА	20-40**	20	20-40**	20	20-40**	20-40**	20-40**	20-40**	20-40**
2 с, кА	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Длина пути утечки внешней изоляции, мм, не менее	2270	2270	4550	4550	6600	9500	14200	14200	21600

Примечания 1) * - значения для справок.

2) ** - по требованию заказчика с 2000 г.

3) Прочерк означает, что параметр не нормируется.

Таблица П4.1.3

Электрические характеристики грязестойких ОПН 110 и 220 кВ

Наименование параметра	Норма			
	ОПН-110 II УХЛ1	ОПН-110 IV УХЛ1	ОПН-220 II УХЛ1	ОПН-220 IV УХЛ1
Класс напряжения, кВ	110	110	220	220
Наибольшее рабочее напряжение, кВ дейст.	73	73	146	146
Напряжение на ограничителе, допустимое в течение времени, кВ дейст.				
20 мин	101	101	201	201
20 с	109	109	217	217
3,5 с	114	114	227	227
1 с	120	120	240	240
0,15 с	128	128	256	256
Расчетный ток коммутационных перенапряжений на волне 1,2/2,5 мс, А	280	280	420	420
Остающееся напряжение при расчетном токе	220	220	435	435

коммутационных перенапряжений, кВ не более				
Остающееся напряжение при импульсном токе с длительностью фронта волны 8 мкс с амплитудой 5000 А, кВ не более	285	285	525	525
Пропускная способность				
20 импульсов тока 1,2/2,5 мс с амплитудой, А	280	280	420	420
20 импульсов тока 8/20 мкс с амплитудой, А	5000	5000	5000	5000
Длина пути утечки внешней изоляции, мм, не менее	2800	3900	5700	7900
Взрывобезопасность при токах к.з.:				
0,2 с, кА	20-40*	20-40*	20-40*	20-40*
2 с, кА	0,8	0,8	0,8	0,8

Примечание: * - по требованию заказчика с 2000 года.

Таблица П4.1.4

Электрические характеристики ОПН для защиты нейтрали трансформаторов

Наименование параметра	Норма	
	ОПНН-110 У1 ОПНН-110 ХЛ1	ОПНН-220 У1 ОПНН-220 ХЛ1
Класс напряжения, кВ	110	220
Наибольшее рабочее напряжение, кВ действ.	56	115
Напряжение на ограничителе, допустимое в течение 1 мин, кВ действ.	73	150
Расчетный ток коммутационного перенапряжения, А		
волна 30/60 мкс,	-	-
волна 300/800 мкс	1500	1500
Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационного перенапряжения, кВ, не более	155	310
Пропускная способность: 20 импульсов тока 2000 мкс	400	400

с амплитудой, А		
Взрывобезопасность при токах к.з.:		
0,2 с, кА	20-40*	20-40*
2 с, кА	0,8	0,8
Длина пути утечки внешней изоляции, мм, не менее	1750	3600

Примечание: * - по требованию заказчика с 2000 года.

4.2. Электрические характеристики ОПН 110-750 кВ, выпускаемых "ABB-УЭТМ" в фарфоровых покрывках "ABB-УЭТМ" производит также ОПН 6-35 кВ.

Таблица П4.2.1

Модификации ОПН серии Exlim для разных уровней загрязнения атмосферы

Уровень загрязнения	Длина удельного пути утечки	Условное обозначение
I - легкий	1,6 см/кВ	L
II - средний	2,0 см/кВ	M
III - тяжелый	2,5 см/кВ	H
IV - очень тяжелый	3,1 см/кВ	V

Таблица П4.2.2

Электрические характеристики ОПН 110 кВ

Характеристика	Тип ограничителя																			
	EXLIM ABB с классом энергоемкости																			
	R					Q					P-A и P-B					T				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Наибольшее рабочее напряжение	77	86	92	106	92	77	86	92	106	108	77	86	92	92	108	77	92	92	108	

Номинальный разрядный ток 8/20 мкс, кА	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20
Квазиустановившиеся перенапряжения, допустимые в течение времени, кВ дейст:																			
20 мин	95	107	119	130	137	93	105	116	128	139	93	105	117	140	139	91	114	132	154
20 с	104	117	130	142	149	104	117	130	142	156	104	117	130	155	156	102	127	146	172
10 с	106	119	132	145	152	106	119	132	145	158	106	119	130	158	158	103	129	149	174
3,5 с	108	121	134	147	155	108	121	134	148	162	109	122	135	163	163	106	133	154	180
1 с	110	124	138	152	159	111	125	139	153	167	111	125	139	167	167	109	136	157	184
0,15	114	128	143	157	162	116	132	148	163	175	116	131	145	174	173	114	143	165	193
Остающееся напряжение при расчетном коммутационного напряжения, кВ:																			
при волне 1,2/2,5 мс 280 А	192	217	240	264	276	185	207	230	252	276	175	198	223	257	257	174	219	251	295
при волне 2 мс 500 А	199	224	248	273	286	188	211	234	257	281	-	-	-	-	-	-	-	-	-
при волне 2 мс 1000 А	207	232	256	281	294	192	216	239	262	286	187	210	235	280	280	184	230	262	310
Остающееся напряжение при импульсном токе 8/20 мкс с амплитудой, кВ																			
3000 А	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	198	223	248	297	297	19	24	27	327

я перенапряжения, допустимые в течение времени, кВ дейст:															
а) 20 мин	196	214	226	186	210	233	256	186	221	250	285	256	182	217	251
б) 20 с	214	233	246	207	233	259	285	207	246	279	318	285	204	242	280
в) 10 с	218	238	251	211	238	264	290	211	251	284	323	290	207	246	285
г) 3,5 с	222	242	255	216	243	270	297	217	258	292	332	298	213	253	293
д) 1 с	228	248	262	223	251	278	306	223	264	299	341	306	218	259	300
е) 0,15	236	257	271	233	262	292	321	232	276	312	356	319	228	271	314
Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационного напряжения, кВ															
а) при волне 1,2/2,5 мс 420 А	400	437	460	372	419	466	513	360	425	482	550	493	353	420	486
б) при волне 2 мс 500 А	404	441	465	374	421	468	515	-	-	-	-	-	-	-	-
в) при волне 2 мс 1000 А	420	458	483	382	430	477	525	374	444	502	572	514	368	437	506
Остающееся напряжение при импульсном токе 8/20 мкс с амплитудой, кВ															
3000 А	-	-	-	-	-	-	-	396	470	532	606	544	387	459	532
5000 А	488	532	561	436	491	545	600	418	496	562	640	575	405	481	557
10000 А	521	569	600	461	519	576	634	442	525	594	677	608	423	502	581
Удельная энергоёмкость, кДж/кВ расчетного напряжения	2,5	2,5	2,5	4,5	4,5	4,5	4,5	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	10,0	10,0	10,0

Полная энергоемкость всего ограничителя, кДж	495	540	570	864	972	1080	1188	1344	1596	1806	2058	1848	1920	2280	2640
Максимальный ток короткого замыкания для сброса давления, кА длительностью															
0,2 с	50	50	50	65	65	65	65	A-65 B-80	A-65 B-80	A-65 B-80	A-65 B-80	A-65 B-80	80	80	80
2 с	Сброс давления происходит за время от 0,5 с; до 1 с при горении дуги ограничитель термически устойчив														
Испытательные напряжения внешней изоляции:															
а) коммутационный импульс 250/2500 мкс в сухом состоянии и под дождем, кВ	Должно быть не менее, чем на 20% выше остающегося напряжения при токе коммутационного перенапряжения 420 А														
б) полный грозовой импульс, кВ	Должно быть не менее, чем на 10% выше остающегося напряжения при токе 5000 А														

Таблица П4.2.4

Электрические характеристики ОПН 330 кВ

Характеристика	Тип ограничителя										
	EXLIM ABB с классом энергоемкости										
	Q			P-A и P-B				T			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Расчетное (номинальное) напряжение, кВ действ.	264	276	288	276	312	336	360	276	288	360	
Наибольшее рабочее напряжение ограничителя, кВ действ.	211	221	230	221	230	230	267	221	230	267	

Таблица П4.2.5

Электрические характеристики ОПН 500 кВ и 750 кВ

Характеристика	Тип ОПН				
	Exlim ABB				
	P		T		
	500 кВ			750 кВ	
Расчетное (номинальное) напряжение, кВ действ.	396	468	396	444	588
Наибольшее рабочее напряжение ограничителя, кВ действ.	318	350	318	350	462
Номинальный разрядный ток 8/20 мкс, кА	10	10	20	20	20
Квазиустановившиеся перенапряжения, допустимые в течение времени, кВ действ:					
а) 20 мин	384	454	376	422	559
б) 20 с	428	505	420	471	623
в) 10 с	436	515	427	479	635
г) 3,5 с	447	529	440	493	653
д) 1 с	459	543	451	506	670
е) 0,15	479	566	471	528	700
Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационного напряжения, кВ					
а) при волне 1,2/2,5 мс 1200/1800 А	778	918	764	857	1156
б) при волне 2 мс 500 А	-	-	-	-	-
в) при волне 2 мс 1000 А	771	911	758	850	1125
Остающееся напряжение при импульсном токе 8/20 мкс с амплитудой, кВ					

3000 А	816	964	798	894	1183
5000 А	862	1018	835	936	1239
10000 А	911	1077	872	977	1293
Удельная энергоемкость, кДж/кВ расчетного напряжения	7,0	7,0	10,0	10,0	10,0
Полная энергоемкость всего ограничителя, кДж	2772	3276	3960	4440	5880
Максимальный ток короткого замыкания для сброса давления, кА длительностью					
0,2 с	А-65 В-80	А-65 В-80	80	80	80
2 с	Сброс давления происходит за время до 0,5 с; до 1 с при горении дуги ограничитель термически устойчив				То же, что 500 кВ
Испытательные напряжения внешней изоляции:					
а) коммутационный импульс 250/2500 мкс в сухом состоянии и под дождем, кВ	*				**
б) полный грозовой импульс, кВ	***				

* Должно быть не менее, чем на 20% выше остающегося напряжения при токе коммутационного перенапряжения 1200 А.

** Должно быть не менее, чем на 20% выше остающегося напряжения при токе коммутационного перенапряжения 1800 А.

*** Должно быть не менее, чем на 10% выше остающегося напряжения при токе 5000 А.

4.3. Электрические характеристики ОПН 110-500 кВ,

выпускаемых фирмой "ФЕНИКС-88" в полимерных покрышках

"Феникс-88" производит также ОПН 6-35 кВ.

Таблица П4.3.1

Электрические характеристики ОПН 110-220 кВ

Параметры	ОПН-110/73	ОПН-110/80	ОПН-110/88	ОПН-220/146	ОПН-220/157	ОПН-220/176
Длительное рабочее напряжение ОПН, кВ	73	80	88	146	157	176

Класс напряжения сети, кВ		110			220		
Напряжение, допустимое на ОПН в течение, кВ	0,1 с	110	120	132	219	236	264
	1,0 с	105	115	127	210	226	253
	10 с	100	110	121	200	215	241
	20 мин	90	98	108	180	193	216
	2 ч	86	94	104	172	185	208
	10 ч	82	90	99	165	177	199
	24 ч	80	88	97	161	173	194
Остающиеся напряжения, кВ, при импульсе тока с фронтом 30 мкс длительностью 60 мкс и с амплитудой:	250 А, не более не менее	176	193	212	359	386	433
		169	186	204	346	372	417
	500 А, не более не менее	180	197	216	365	393	440
		172	189	208	352	378	424
	1000 А, не более не менее	185	203	224	378	407	456
		178	195	215	364	391	438
	2000 А, не более не менее	195	214	235	397	427	479
		187	205	225	381	410	459
Остающиеся напряжения, кВ, при импульсе тока с фронтом 8 мкс, длительностью	500 А, не более не менее	180	198	217	366	394	442
		173	190	209	353	380	426

20 мкс и с амплитудой:							
	3000 А, не более	201	220	242	409	440	493
	не менее	193	212	233	394	424	475
	5000 А, не более	210	230	253	428	460	516
	не менее	202	222	244	412	443	496
10000 А, не более	226	248	273	461	496	556	
	не менее	218	238	262	444	477	535
20000 А, не более	247	270	297	502	540	605	
	не менее	237	260	286	483	520	583
Остающиеся напряжения, кВ, при импульсе тока с фронтом 1 мкс, длительностью 4 мкс и с амплитудой 10000 А	не более	246	270	297	501	539	604
	не менее	237	259	285	482	518	581
Амплитуда выдерживаемого не менее 20 раз импульса большой длительности (прямоугольный импульс 2000 мкс), А		600					
Длина пути утечки изоляции, см, не менее		230			460		

Таблица П4.3.2

Электрические характеристики ОПН для защиты разземленных нейтралей трансформаторов 110-220 кВ

Параметры		ОПНН-110	ОПНН-220
Длительное рабочее напряжение ОПН, кВ		56	120
Класс напряжения сети, кВ		110	220
Напряжение, кВ, допустимое на ОПН в течение	0,1 с	84,0	180
	1,0 с	80,6	173
	10 с	76,7	164
	60 с	73,9	158
	20 мин	68,9	148
	2 ч	66,1	142
	24 ч	61,6	132
Остающиеся напряжения, кВ, при импульсе тока с фронтом 30 мкс, с длительностью 60 мкс и с амплитудой:	250 А, не более	135	295
	не менее	130	286
	500 А, не более	138	300
	не менее	132	290
	1000 А, не более	142	311
	не менее	137	301
	2000 А, не более	150	326
	не менее	143	316
Остающиеся напряжения, кВ, при импульсе тока с фронтом 8 мкс, с длительностью 20 мкс и с амплитудой:	500 А, не более	138	302
	не менее	133	293
	3000 А, не более	154	336

	не менее	148	325
	5000 А, не более	161	352
	не менее	155	341
	10000 А, не более	174	379
	не менее	167	368
	20000 А, не более	189	413
	не менее	182	402
Остающиеся напряжения, кВ, при импульсе тока с фронтом 1 мкс, с длительностью 4 мкс и с амплитудой 10000 А	не более	189	412
	не менее	181	400
Амплитуда выдерживаемого не менее 20 раз импульса большой длительности (прямоугольный импульс 2 мс), А		600	
Длина пути утечки изоляции, см, не менее		150	300

Таблица П4.3.3

Электрические характеристики ОПН 500 кВ

Параметры		ОПН-500/303	ОПН-500/333
Длительное рабочее напряжение ОПН, кВ		303	333
Напряжение, допустимое на ОПН в течение:	0,15 с	470	520
	1,0 с	440	485
	3,5 с	425	470
	20 с	390	430
	20 мин	365	400

	1 ч	355	390
	3 ч	345	380
	8 ч	335	370
Остающиеся напряжения, кВ, при крутом импульсе тока 1/4 мкс с амплитудой 20000 А	не более	1060	1165
	не менее	1020	1115
Остающиеся напряжения, кВ, при грозовом импульсе тока 8/20 мкс, с амплитудой	1500 А, не более	790	870
	не менее	760	835
	10000 А, не более	910	1000
	не менее	875	960
	20000 А, не более	975	1070
	не менее	940	1030
	40000 А, не более	1075	1180
	не менее	1035	1135
Остающиеся напряжения, кВ, при коммутационном импульсе тока 30/60 мкс, с амплитудой:	500 А, не более	745	820
	не менее	720	790
	1000 А, не более	770	845
	не менее	740	815
	2000 А, не более	810	890
	не менее	780	860
Амплитуда выдерживаемого не менее 20 раз импульса большой длительности (прямоугольный импульс 2 мс), А		1200	

4.4. Электрические характеристики ограничителей серии ОПН-У 110-220 кВ,

выпускаемых фирмой "ТАВРИДА-ЭЛЕКТРИК" в полимерных покрышках
 "Таврида-Электрик" производит также ОПН 6-35 кВ.

Таблица П4.4.1

Электрические характеристики ограничителей серии ОПН-У

Наименование параметра, размерность						
Класс напряжения сети, Кв, дейст.	110			220		
Наибольшее длительно допустимое напряжение ОПН-У, $U_{нд}$, кВ, дейст.	73	77	84	146	154	168
Номинальный разрядный ток 8/20 мкс, кА	10					
Остающееся напряжение на ОПН-У, кВ макс, не более, при импульсе тока						
150 А, 30/60 мкс*	178	186	203	356	372	406
500 А, 30/60 мкс*	183	193	211	366	386	422
500 А, 8/20 мкс**	185	195	213	370	390	426
5000 А, 8/20 мкс	218	230	251	436	460	502
10000 А, 8/20 мкс	233	246	269	466	492	538
20000 А, 8/20 мкс	251	264	289	502	528	580
Наибольшее напряжение в долях $U_{нд}$, допустимое после поглощения ОПН максимальной энергии	См. рисунок					

Примечание: * - любой импульс с фронтом более 30 мкс, ** - не более и не менее

Пропускная способность ограничителей ОПН-У обеспечивает без повреждений воздействие 20 импульсов тока прямоугольной формы длительностью 2000 мкс с амплитудой 450 А.

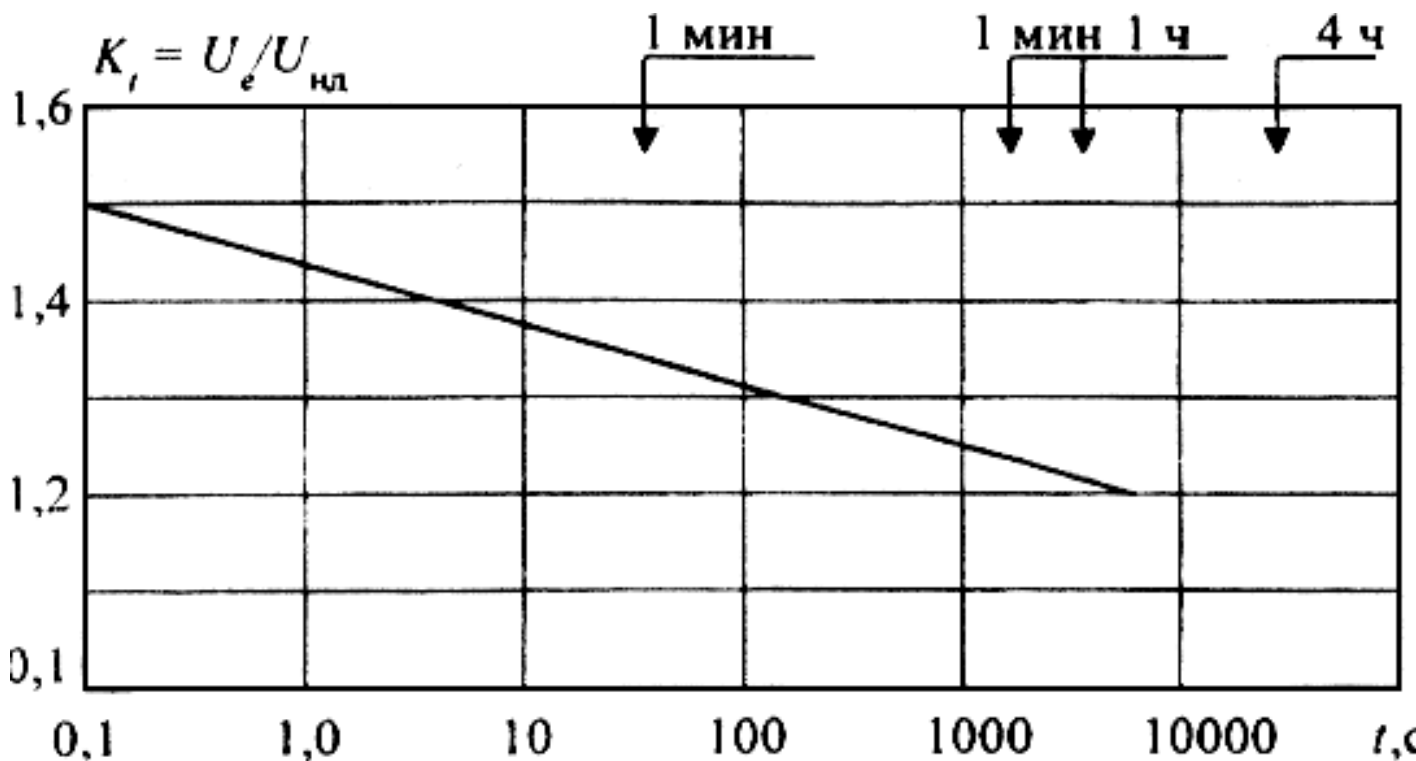


Рис.П4.1. Наибольшее допустимое напряжение в долях $U_{нд}$ в зависимости от воздействия

Длины пути утечки по ГОСТ 16357 и ГОСТ 9920 - в соответствии с указанной заказчиком степенью загрязнения: для II степени загрязнения - 2,25 см/кВ, для III степени загрязнения - 2,5 см/кВ, для IV - 3,1 см/кВ.

Конструкция ограничителя обеспечивает его взрывобезопасность при протекании тока внутреннего замыкания с действующим значением: 40000 А $\pm 10\%$ не менее 0,2 с и 800 А $\pm 10\%$ не менее 2 с. Категория взрывобезопасности А по ГОСТ 16357-83.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

НАИМЕНЬШИЕ ДОПУСТИМЫЕ РАССТОЯНИЯ В СВЕТУ ОТ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЧАСТЕЙ ДО РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОРУ 110-750 кВ И ЗРУ 110-330 кВ, ЗАЩИЩЕННЫХ ОПН С ЗАЩИТНЫМ УРОВНЕМ ФАЗА-ЗЕМЛЯ 1,8

Применение ОПН вместо разрядников позволяет сократить воздушные изоляционные промежутки и размеры ОРУ и подстанций. Наименьшие допустимые расстояния в свету для ОРУ (ПС) приведены в табл.П5.1.

Таблица П5.1

Наименьшие расстояния в свету от токопроводящих частей до различных элементов ОРУ (ПС) 110-750 кВ, защищенных ограничителями перенапряжений с защитным уровнем фаз-земля 1,8

Наименование расстояния	Обозначение	Изоляционное расстояние, мм, для номинального напряжения, кВ				
		110	220	330	500	750

		ОПН	ОПН	ОПН	ОПН	ОПН
От токопроводящих частей, элементов оборудования и изоляции, находящихся под напряжением, до земли и постоянных внутренних ограждений высотой не менее 2 м, а также стационарных межъячейковых экранов и противопожарных перегородок.	A Φ -3	600	1200	2000	3000	5200
От токопроводящих частей, элементов оборудования и изоляции, находящихся под напряжением, до заземленных конструкций: головка аппарата-опора; провод-стойка, траверса; провод-кольцо, стержень.	¹ A Φ -3	600	1200	1600	2700	4500
Между токопроводящими частями разных фаз	A Φ - Φ	750	1600	2200	3400	6000
От токопроводящих частей, элементов оборудования и изоляции, находящихся под напряжением, до постоянных внутренних ограждений высотой до 1,6 м, до транспортируемого оборудования.	Б	1350	1950	2350	3450	5250
Между токопроводящими частями разных цепей в разных плоскостях при обслуживаемой нижней цепи и неотключенной верхней.	В	1800	2400	2800	3900	6000
От неогражденных токопроводящих частей до земли или до кровли зданий при наибольшем провисании провода.	Г	3300	3900	4700	5700	7900
Между токопроводящими частями разных цепей в разных плоскостях, а также между токопроводящими частями разных цепей по горизонтали при обслуживании одной цепи и неотключенной другой.	¹ Д	2600	3200	3600	4700	6500

Пояснения к табл.П5.1:

Для элементов изоляции, находящихся под распределенным потенциалом, изоляционные расстояния следует принимать с учетом фактических значений потенциалов в разных точках изоляции. При отсутствии данных о распределении потенциала следует условно принимать линейный закон падения потенциала вдоль изоляции от полного номинального фазного напряжения со стороны токопроводящих частей до нуля со стороны заземленных частей.

Расстояния от токопроводящих частей или элементов изоляции со стороны токопроводящих частей, находящихся под напряжением, до габаритов трансформаторов, транспортируемых по железнодорожным путям, допускается принять менее размера Б, но не

менее размера $A_{\Phi-3}^1$.

Расстояния $A_{\Phi-3}$, $A_{\Phi-3}^1$ и $A_{\Phi-\Phi}$ для ОРУ 220 кВ и выше, расположенных на высоте более 1000 м над уровнем моря, должны быть увеличены в соответствии с требованиями ГОСТ 1516-76, а расстояния $A_{\Phi-\Phi}$, В и D^1 должны быть проверены по условиям ограничения короны на ошиновке ОРУ (ПС).

Наименьшие допустимые расстояния в свету для ЗРУ приведены в табл.П5.2.

Таблица П5.2

Наименьшие расстояния в свету от токопроводящих частей до различных элементов ЗРУ 110-330 кВ, защищенных ограничителями перенапряжений типа ОПН с защитным уровнем фаза-земля 1,8

Наименование расстояние	Обозначение	Изоляционные расстояния, мм, для номинального напряжения, кВ		
		110	220	330
От токопроводящих частей до заземленных конструкций и частей здания	$A_{\Phi-3}$	600	1200	2000
Между проводниками разных фаз	$A_{\Phi-\Phi}$	750	1600	2200
От токопроводящих частей до сплошных ограждений	Б	650	1250	2050
От токопроводящих частей до сетчатых ограждений	В	700	1300	2100
Между неограженными токопроводящими частями разных цепей	Г	2800	3400	4200
От неограженных токопроводящих частей до пола	Д	3300	3700	4500
От неограженных выводов из ЗРУ до земли при выходе их не на территорию ОРУ и при отсутствии проезда под выводами	Е	5400	6000	6800
От контакта и ножа разъединителя в отключенном положении до ошиновки, присоединенной ко второму контакту	Ж	850	1800	2500

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОЖИДАЕМОГО СРОКА СЛУЖБЫ ОПН 110-1150 кВ

6.1. Исходные положения

Методика расчета ожидаемого срока службы ОПН состоит в проверке надежности его работы при ограничении коммутационных перенапряжений в условиях конкретной электропередачи. Надежность защищающего электропередачу ОПН является достаточной, если ожидаемый с доверительной вероятностью $P_{\text{дов}}$ срок службы $N_{\text{сл}}$ ОПН, т.е. ожидаемое число лет его безаварийной работы, будет не менее нормируемого техническими условиями. Нормы указаны в таблице Пб.1.

Таблица Пб.1

Нормируемый техническими условиями на ограничители срок службы

$U_{\text{н}}$, кВ	110	220	330	500	750	1150
$P_{\text{дов}}$	0,98					
$N_{\text{сл}}$, лет, не менее	20	20	25	25	30	30

Методика расчета состоит из следующих этапов:

- расчет статистического распределения амплитуд неограниченных перенапряжений в точке установки ограничителя;
- расчет статистического распределения ресурса, расходуемого резистором ограничителя в течение одного года;
- определение ожидаемого срока службы ограничителя.

Токовые нагрузки на ограничители, установленные на разомкнутом конце, как правило превосходят токовые нагрузки на ограничители питающего конца (рис.П2.1), поэтому оценка надежности, т.е. ожидаемого на заданном уровне доверительной вероятности срока безаварийной службы ОПН, должна производиться для ограничителей, установленных как на питающем, так и на разомкнутом конце передачи отдельно. В ряде случаев такой подход может оказаться оправданным экономически.

В симметричном режиме амплитуда неограниченных перенапряжений k есть произведение ударного коэффициента перенапряжений N на вынужденную составляющую переходного процесса перенапряжений U :

$$k = N U \quad (Пб.1)$$

В несимметричных режимах успешного ОАПВ и при однополюсном к.з. амплитуды неограниченных перенапряжений вычисляются по формулам:

$$k = N v_{\text{ОАПВ}}, \quad k_{\text{к.з}} = N v_{\text{к.з}} = N v h_{\text{к.з}}. \quad (\text{П6.2})$$

В формулах (П6.1) и (П6.2) ударный коэффициент характеризует вид коммутации и интенсивность переходного процесса, а вынужденная составляющая - схему и режим электропередачи.

В симметричном режиме математическое ожидание (\bar{k}), среднеквадратичное отклонение (σ_k) амплитуды неограниченных перенапряжений определяются так:

$$\bar{k} = \bar{N} \bar{v}; \quad \sigma_k = \sqrt{\bar{N}^2 \sigma_v^2 + \bar{v}^2 \sigma_N^2}. \quad (\text{П6.1a})$$

В несимметричных режимах успешного ОАПВ и однофазного к.з. в качестве \bar{k} и σ_k имеем:

$$\bar{k}_{\text{ОАПВ}} = \bar{N}_{\text{ОАПВ}} \bar{v}_{\text{ОАПВ}}; \quad \sigma_{\text{ОАПВ}} = \sqrt{\bar{N}_{\text{ОАПВ}}^2 \sigma_{v_{\text{ОАПВ}}}^2 + \bar{v}_{\text{ОАПВ}}^2 \sigma_{N_{\text{ОАПВ}}}^2}; \quad (\text{П6.2a})$$

$$\bar{k}_{\text{к.з}} = \bar{N}_{\text{к.з}} \bar{v}_{\text{к.з}}; \quad \sigma_{\text{к.з}} = \sqrt{\bar{N}_{\text{к.з}}^2 \sigma_{v_{\text{к.з}}}^2 + \bar{v}_{\text{к.з}}^2 \sigma_{N_{\text{к.з}}}^2}; \quad (\text{П6.2б})$$

где \bar{N} и σ_N^2 - математическое ожидание и дисперсия ударного коэффициента перенапряжений в симметричной коммутации включения ВЛ, \bar{v}_i и σ_{v_i} - то же самое для вынужденной составляющей перенапряжений в i -ой коммутации.

Если наименьшая из частот собственных колебаний коммутируемой электропередачи

$$\beta_1 \geq 1,6\omega, \quad (\text{П6.3a})$$

то ударный коэффициент перенапряжений, возникающих на ее разомкнутом конце статистически инвариантен относительно структуры и параметров этой передачи. Это означает, что вид закона статистических распределений N_P определяется только типом коммутации (скажем, включение ВЛ или ТАПВ и т.д.), а параметры этого закона, т.е. \bar{N}_P , σ_P и т.д. одинаковы для любой электропередачи независимо от ее сложности и класса номинального напряжения.

Ударный коэффициент перенапряжений, возникающих на питающем конце передачи N_{Π} , подчиняется тому же закону, что и N_P . Скажем, если в какой-то коммутации N_P распределен по нормальному закону, то в этой коммутации N_{Π} тоже подчиняется нормальному закону, но параметры этого закона другие, $\bar{N}_{\Pi} \neq \bar{N}_P$; $\sigma_{\Pi} \neq \sigma_P$.

На рис.П6.1 показаны зависимости \bar{N}_Π / \bar{N}_P и σ_Π / σ_P от безразмерного параметра

$$\vartheta = \frac{X_\Pi}{Z_W \operatorname{tg} \lambda^{(1)}} \quad (\text{П6.36})$$

Для схемы рис.П2.1, а $X_\Pi = X_1$.

Для схемы рис.П2.1, б:

$$X = \frac{X_1}{1 + \frac{Z_W}{X_{p2}} \left(1 + \frac{X_1}{Z_W} \right) + \frac{Z_W X_1}{X_{p1}} \left(\frac{1}{Z_W} + \frac{1}{X_{p2}} \right)} \quad (\text{П6.3в})$$

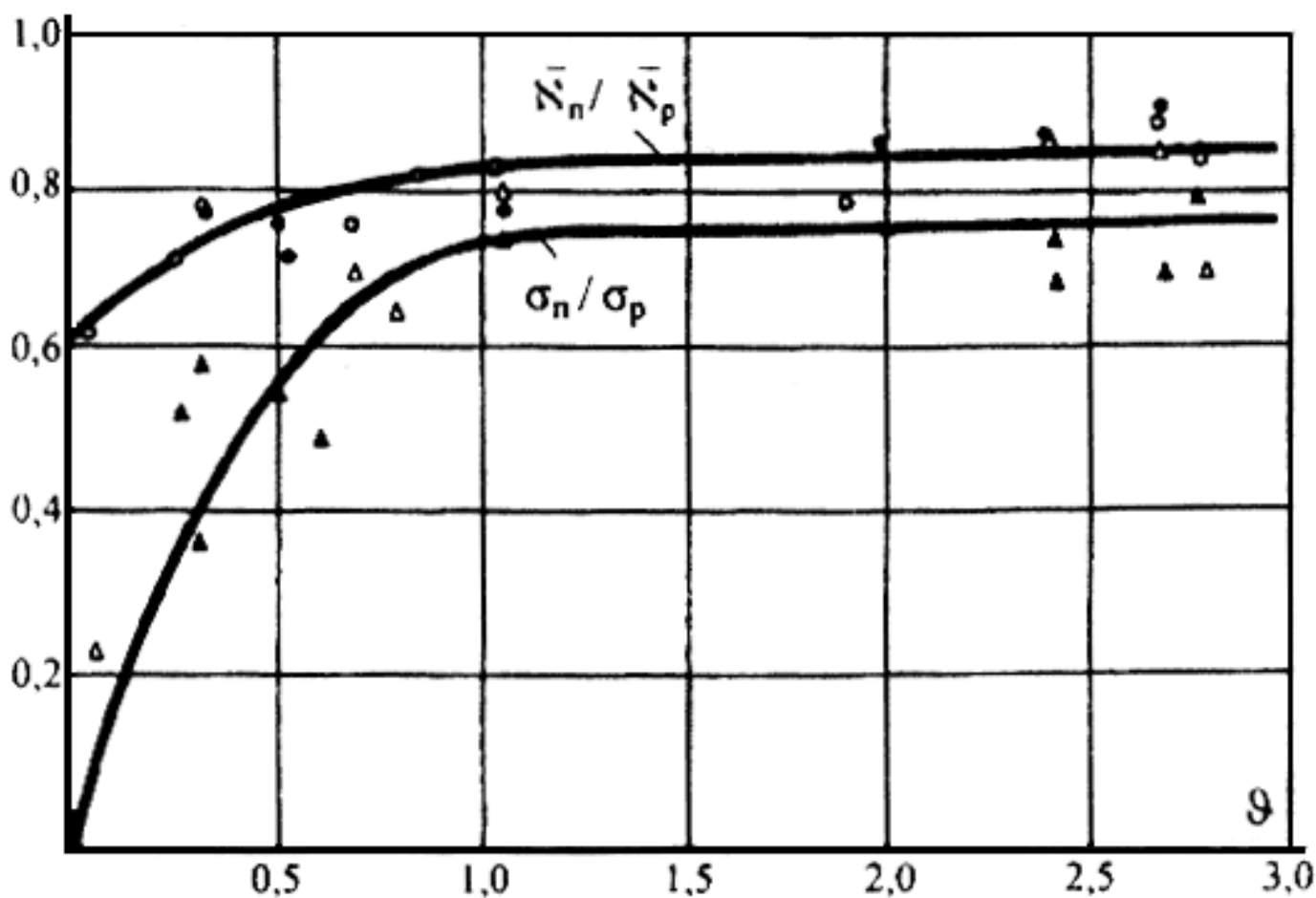


Рис.П6.1. Зависимость отношений \bar{N}_Π / \bar{N}_P и σ_Π / σ_P от параметра ϑ :

кружки, треугольники - опытные точки, соответственно \bar{N}_Π / \bar{N}_P и σ_Π / σ_P ;

белые и черные значки, соответственно ВЛ без заряда и предварительно заряженные

Частоту β_1 / ω следует определять по номограмме Приложения 3, а необходимые для

этого величины X_{Π} и $\lambda^{(1)}$ - по формуле (П6.3в) и данным табл.П2.4 Приложения 2.

Вольт-амперная характеристика ограничителя при коммутационных перенапряжениях имеет следующий вид:

$$k_{\text{ост}} = AI^{\alpha} = AI^{0,04}$$

Численные значения параметра A в относительных единицах, т.е. $A/A_{\text{баз}}$ указаны в табл.П6.2. Расчеты удобно вести в относительных единицах, приняв за базисные указанные в табл.П6.2.

Таблица П6.2

Система базисных единиц

$U_{\text{н}}$, кВ	110	220	330	500	750	1150
$U_{\text{баз}}$, кВ	103	206	297	428	643	937
$Z_{\text{баз}}$, Ом	570	530	450	365	330	280
$L_{\text{баз}}$, Гн	1,82	1,69	1,43	1,16	1,05	0,89
$C_{\text{баз}}$, мкФ	5,6	6,0	7,1	8,7	9,7	11,4
$I_{\text{баз}}$, А	180	390	665	1170	1940	3345
$A_{\text{баз}} \times 10^{-3}$	84	162	229	323	475	682
$A/A_{\text{баз}}$	1,71	1,75	1,76	1,77	1,75	1,68

6.2. Статистические распределения неограниченных перенапряжений
в точке установки ОПН

Статистические распределения амплитуд неограниченных перенапряжений, ударные коэффициенты которых не зависят от времени (это все виды коммутаций, кроме успешного и неуспешного ТАПВ) рассчитывают следующим образом. В табл.П6.3. эти виды коммутаций помечены индексами $S = 1; 2; 3; 4; 5; 6$ и 9. Численные значения математического ожидания \bar{N} и среднеквадратичного отклонения σ_N ударных коэффициентов в этих видах

перенапряжений, полученные в результате экспериментов в действующих энергосистемах, приведены в табл.П6.3.

Таблица П6.3

Параметры ударных коэффициентов \bar{N} и σ_N

S	1	2	3	4	5	6	9*
\bar{N}	1,61	1,39	1,55	2,04	1,4	1,34	$N(\Theta_A) / 1,53$
σ_N	0,183	0,197	0,15	0,352	0,128	0,132	$\sigma_N(\Theta_A) / 0,175$

* - числитель - передачи, оборудованные автоматикой прекращения асинхронного хода (АПАХ) с уставкой Θ_A (см. рис.П6.2); знаменатель - передачи без АПАХ.

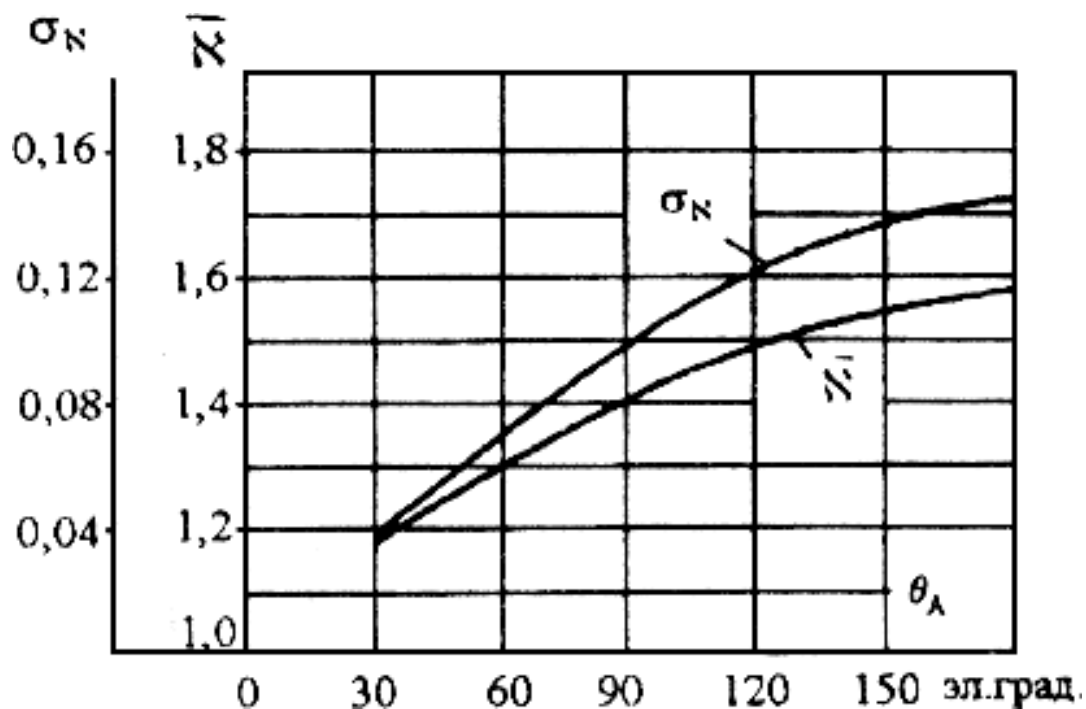


Рис.П6.2. Зависимость математического ожидания и среднеквадратичного отклонения ударных

коэффициентов при разрыве электропередачи из-за асинхронного хода от установки АПАХ

В этих коммутациях статистические распределения амплитуд неограниченных перенапряжений определяются по следующим формулам:

для $S=1; 2; 3$

$$P_k(k) = P\left(\frac{k - \bar{N}v}{v\sigma_N}\right); \quad (\text{П6.4})$$

для $S=4; 5; 6$ $P_{кз}(k_{кз})$ определяется по формуле (П6.4) при значении $\bar{v} = \bar{v}_{кз}$;

для $S=9$ с устройством АПАХ $P_{АХ}(k_{АХ})$ определяется по формуле (П6.4) при значении $\bar{N} = \bar{N}(\Theta_A)$; при отсутствии АПАХ - при значении $\bar{N} = \bar{N}_{АХ}$.

В формуле (П6.4) $P_k(k)$, $P_{кз}(k_{кз})$ и $P_{АХ}(k_{АХ})$ определяют по кривой рис.П6.5, а значения \bar{v} и $\bar{v}_{кз}$ - по формулам (П2.5а) и (П2.7)-(П2.14а) Приложения 2.

Статистические распределения амплитуд неограниченных перенапряжений, ударные коэффициенты которых зависят от времени (это успешное и неуспешное ТАПВ, в табл.П6.3 они помечены индексами $S=7$ и $S=8$) определяют следующим образом.

Таблица П6.4

Ожидаемое число воздействий на резистор одной фазы ОПН за год

S	Вид коммутации	для электропередач, кВ					
		110	220	330	500	750	1150
1	Плановое включение ненагруженной линии	5-8	5-8	3-6	3-6	1-3	1-3
2	Включение ненагруженной блочной электропередачи	5-8	5-8	-			
3	Успешное ОАПВ	-	-	$2,3 \cdot 10^{-3}$ /	$1,45 \cdot 10^{-3}$ /	$1,2 \cdot 10^{-3}$ /	$9 \cdot 10^{-6}$ /
4	Отключение масляными выключателями ненагруженной линии с короткозамкнутой фазой	3-5	3-5	-			
5	Разрыв передачи после неуспешного ОАПВ	-	-	$9,1 \cdot 10^{-3}$ /	$1,35 \cdot 10^{-2}$ /	$6,1 \cdot 10^{-3}$ /	$4 \cdot 10^{-6}$ /
6	Трехфазный разрыв передачи вследствие ликвидации несимметричного к.з.	$3,3 \cdot 10^{-2}$ /	$1 \cdot 10^{-2}$ /	$2,7 \cdot 10^{-2}$ /	$6,5 \cdot 10^{-3}$ /	$1 \cdot 10^{-3}$ /	$0,8 \cdot 10^{-6}$ /

7	Успешное ТАПВ	$2,3 \cdot 10^{-2} \cdot l$	$6,1 \cdot 10^{-2} \cdot l$	$5 \cdot 10^{-4} \cdot l$	$2,6 \cdot 10^{-4} \cdot l$	$2,4 \cdot 10^{-4} \cdot l$	$1,2 \cdot 10^{-6} \cdot l$
8	Неуспешное ТАПВ	$4,4 \cdot 10^{-2} \cdot l$	$2,15 \cdot 10^{-2} \cdot l$	$7 \cdot 10^{-3} \cdot l$	$6,8 \cdot 10^{-3} \cdot l$	$1,2 \cdot 10^{-4} \cdot l$	$0,8 \cdot 10^{-6} \cdot l$
9	Разрыв передачи при асинхронном ходе	-	-	$3,5 \cdot 10^{-5} \cdot l$	$5,4 \cdot 10^{-5} \cdot l$	$4,8 \cdot 10^{-5} \cdot l$	$4,5 \cdot 10^{-7} \cdot l$

Примечание для $S=3; 5; 6; 7; 8$ и 9 указаны удельные значения на 100 км линии длиной l , км

Коммутация успешного ТАПВ ($S=7$). Для известной величины бестоковой паузы $t_{АПВ}$ по кривым рис.П6.3 определяются параметры статистического распределения ударных коэффициентов \bar{N} и σ_N . По формуле (П2.5) Приложения 2 рассчитывается математическое ожидание вынужденного напряжения \bar{v} . По кривой на рис.П6.5 определяется функция распределения амплитуд неограниченных перенапряжений, которая при успешном ТАПВ дается выражением

$$P_k(k) = P\left(\frac{k - \bar{N}v}{v\sigma_N}\right), \quad (\text{П6.5a})$$

где $v = v_p$, либо $v = v_{п}$.

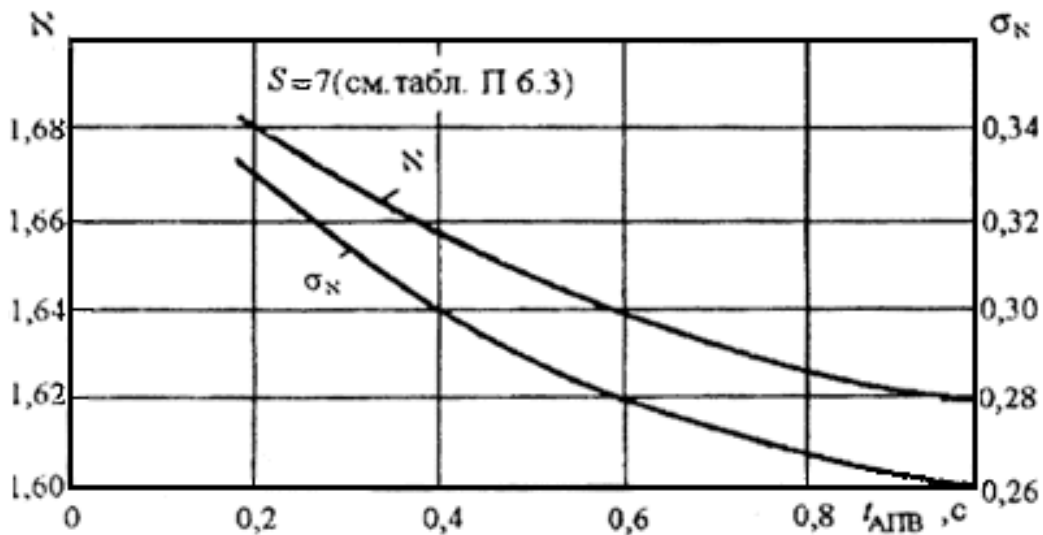


Рис.П6.3. Зависимость параметров распределения ударных коэффициентов при успешном ТАПВ

от длительности бестоковой паузы

Если в электропередачах 110-500 кВ ЭМТН вынесены за линейный выключатель, т.е. установлены непосредственно на коммутируемом участке ВЛ, причем на участке ВЛ 500 кВ нет компенсационных реакторов, то независимо от длительности бестоковой паузы $\bar{N} = 1,61$, $\sigma_N = 0,183$.

Коммутация неуспешного ТАПВ ($S=8$). Для известной величины бестоковой паузы $t_{АПВ}$ по кривым рис.П6.4 определяют параметры статистического распределения ударных коэффициентов \bar{N}_- , \bar{N}_+ , σ_- и σ_+ .

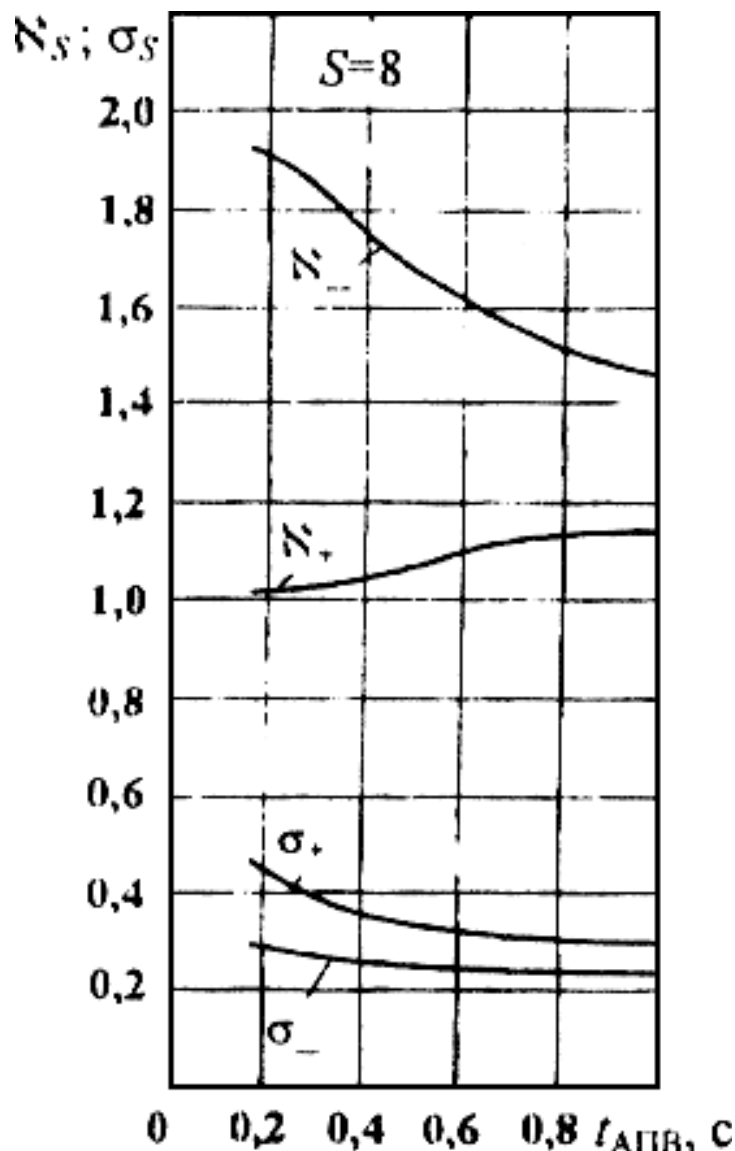


Рис.П6.4. Зависимость параметров распределения ударных коэффициентов при неуспешном ТАПВ

от длительности бестоковой паузы

По кривой рис.П6.5 определяют две функции статистического распределения амплитуд неограниченных перенапряжений в коммутации неуспешного ТАПВ:

$$P_-(k) = P\left(\frac{k - \bar{N}_- \cdot u_{кз}}{u_{кз} \cdot \sigma_-}\right); \quad P_+(k) = P\left(\frac{k - \bar{N}_+ \cdot u_{кз}}{u_{кз} \cdot \sigma_+}\right). \quad (П6.5б)$$

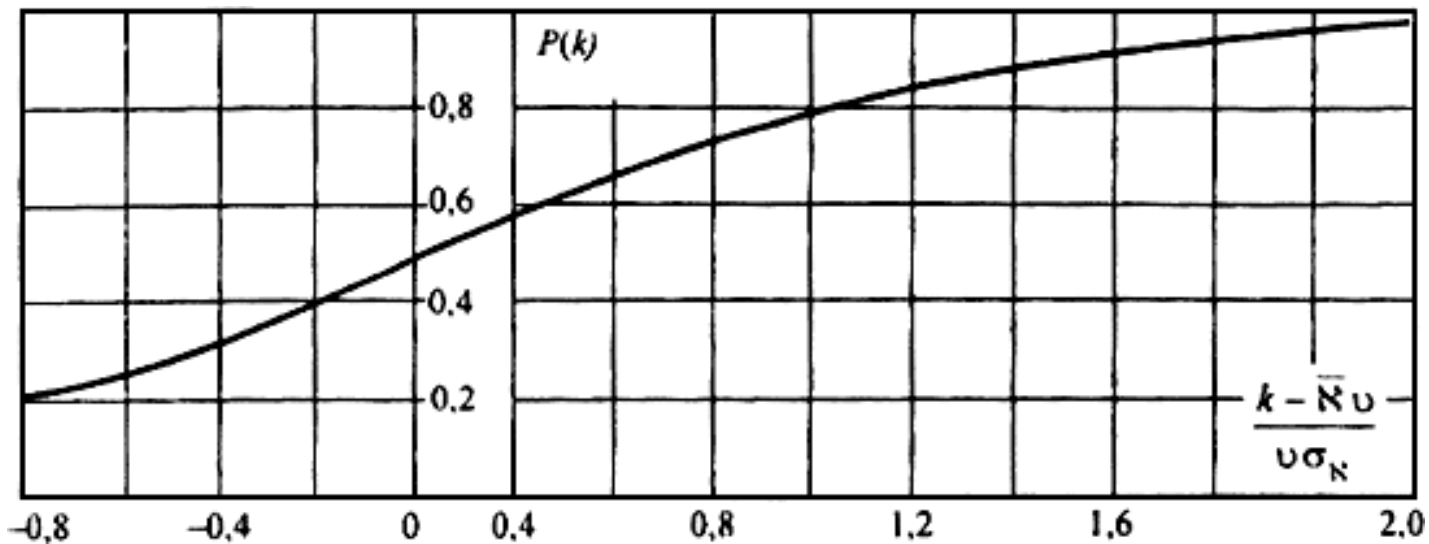


Рис.П6.5. Функция распределения амплитуд неограниченных перенапряжений (v ; $v_{к.з}$;

$v_{\text{ОАПВ}}$ определяются по формуле (П6.7а) и по формулам Приложения 2)

Распределение амплитуд неограниченных перенапряжений при неуспешном ТАПВ дается следующим выражением:

$$P(k) = 0,55P_-(k) + 0,85P_+(k) \quad (\text{П6.6})$$

Распределение амплитуд неограниченных перенапряжений при успешном ОАПВ (в табл.П6.3 эта коммутация помечена индексом $S=3$) определяется следующим образом. Для известной величины бестоковой паузы $t_{\text{ОАПВ}}$ по формулам (П2.15)-(П2.25) Приложения 2 рассчитывают минимальное v_1 и максимальное v_2 значения случайных годовых изменений вынужденного напряжения при успешном ОАПВ. Затем по формулам

$$\bar{v}_{\text{ОАПВ}} = \frac{v_1 v_2}{v_2 - v_1} \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (\text{П6.7а})$$

$$\sigma_{v_{\text{ОАПВ}}}^2 = \frac{v_1 v_2}{v_2 - v_1} \left[(v_2 - v_1) \left(1 + \frac{\bar{v}_{\text{ОАПВ}}^2}{v_1 v_2} \right) - 2\bar{v}_{\text{ОАПВ}} \ln \frac{v_2}{v_1} \right] \quad (\text{П6.7б})$$

определяют математическое ожидание и дисперсию вынужденного напряжения при успешном ОАПВ.

По кривой рис.П6.5 определяют функцию распределения амплитуд неограниченных перенапряжений в коммутации успешного ОАПВ:

$$P_{\text{ОАПВ}}(k_{\text{ОАПВ}}) = P\left(\frac{k_{\text{ОАПВ}} - \bar{v}_{\text{ОАПВ}} \bar{N}_{\text{ОАПВ}}}{\bar{v}_{\text{ОАПВ}} \sigma_{\text{ОАПВ}}}\right) \quad (\text{П6.8})$$

6.3. Расчет статистического распределения ресурса,
расходуемого резистором ОПН в течение одного года

Ресурс, расходуемый резистором ограничителя в течение одного года, равен

$$T_{\text{расх}} = \sum_{s=1}^9 N_s \bar{T}_{Os} \quad , \quad (\text{П6.9})$$

где N_s - ожидаемое число воздействий на ОПН в коммутации S -го типа в течение одного года эксплуатации (см. табл.П6.3);

\bar{T}_{Os} - математическое ожидание ресурса пропускной способности, расходуемого в одной коммутации S -го типа.

Математическое ожидание ресурса, расходуемого в одной коммутации S -го типа, определяется с помощью графического построения, показанного на рис.П6.6, где в третьем квадранте откладывается функция $k_s = f(T_{Os})$, вычисляемая по формуле:

$$k_s = f(T_{Os}) = A T_{Os}^{0,0111} + T_{Os}^{0,286} / b_s \quad , \quad (\text{П6.10})$$

где k_s - неограниченные перенапряжения в коммутации S -го типа; вспомогательный параметр b_s для электропередач 110, 220 и 330 кВ равен единице. Для электропередач 500, 750 и 1150 кВ, если в точке установки ограничителя включен компенсирующий реактор, вспомогательный b_s зависит от амплитуды неограниченных перенапряжений и равен

$$b_s = 1 + a_s / X_p \quad . \quad (\text{П6.11})$$

Величина коэффициента a_s указана в табл.П6.5.

Таблица П6.5

Усредненные численные значения коэффициента a_s

U_n , кВ	Величина k_s					
	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9
500	0,25	0,29	0,32	0,34	0,36	0,38
750	0,27	0,31	0,34	0,38	0,38	0,40
1150	0,30	0,35	0,38	0,40	0,42	0,44

--	--	--	--	--	--	--

Во втором квадранте на рис.П6.6 откладывается функция статистического распределения амплитуд неограниченных перенапряжений $P_k(k_s)$, рассчитанная по формулам (П6.4)-(П6.6) и указаниям, изложенным в пункте 2 Приложения 6.

В результате дальнейшего построения, ход которого на рис.П6.6 показан пунктиром со стрелками, в первом квадранте рис.П6.6 строится зависимость $P_{TS}(T_{Os})$ - функция статистического распределения ресурса пропускной способности, расходуемого резистором ОПН в одной коммутации S -го типа. Расчет $P_{TS}(T_{Os})$ повторяется для всех S , т.е. для электропередач 110 и 220 кВ пять раз ($S=1$ или 2; 4; 6; 7 и 8); для электропередач 330, 500 и 750 кВ семь раз ($S=1; 3; 5; 6; 7; 8$ и 9) (см. табл.П6.3).

На том же рис.П6.6 показан способ графического определения математического ожидания \bar{T}_{Os} , отвечающего заданной доверительной вероятности $P_{\text{ДОВ}}$. Для этого из точки $P_{TS}(T_{Os}) = P_{\text{ДОВ}}$ проводится показанная на рис.П6.6 прямая, параллельная оси абсцисс. Затем путем нескольких проб уравниваются площади, помеченные на рис.П6.6 знаками "+" и "-". Точка пересечения показанной на рис.П6.6 вертикальной прямой, уравнивающей площади, с осью абсцисс есть искомое значение математического ожидания.

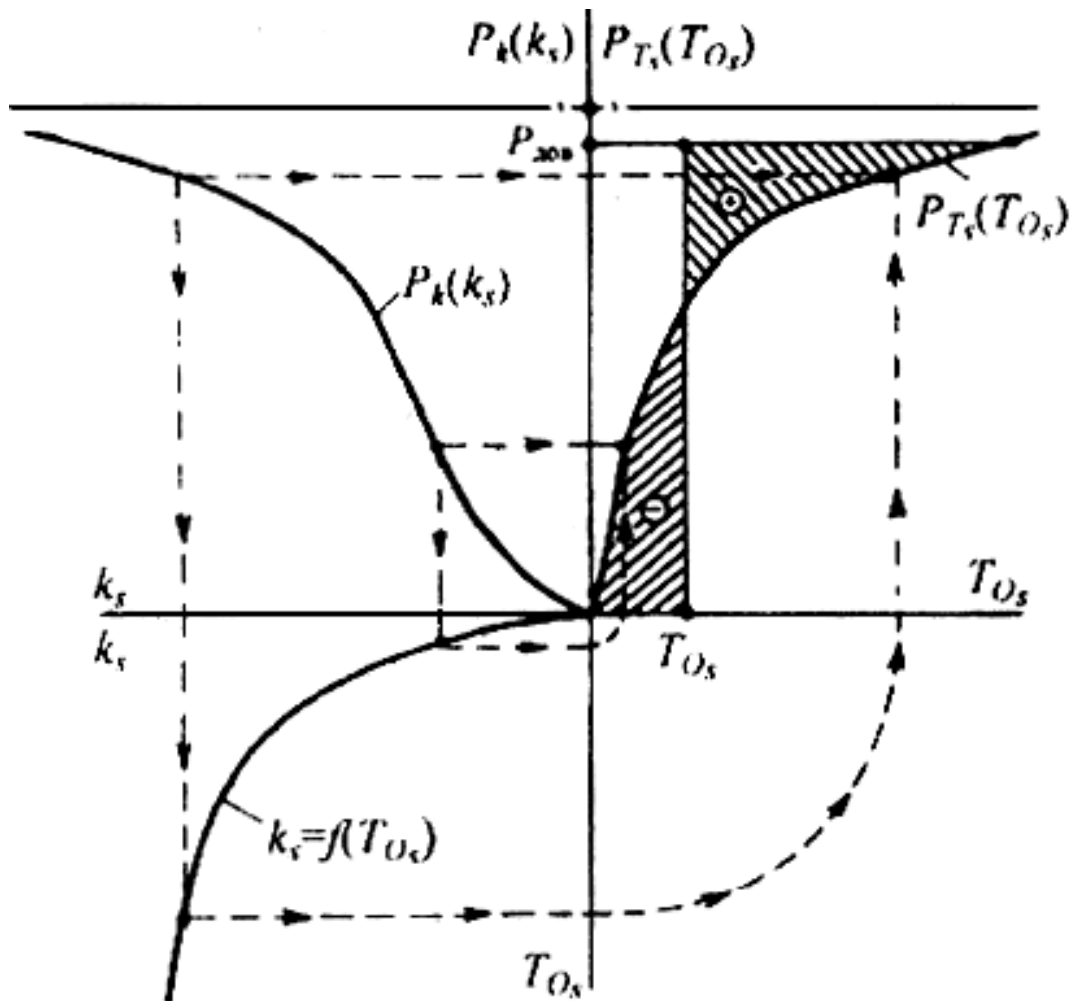


Рис.П6.6. Графическое построение статистического распределения $P_{TS}(T_{OS})$ и математического ожидания \bar{T}_{OS} ресурса, расходуемого в одной коммутации S -го типа, при заданной доверительной вероятности $P_{\text{дов}}$

6.4. Определение ожидаемого срока службы ОПН

Математическое ожидание срока службы ОПН определяется по формуле:

$$\bar{N}_{\text{сл}} = \frac{T_{\text{расп}}}{\bar{T}_{\text{расх}}} = \frac{T_{\text{расп}}}{\sum_S N_S \bar{T}_{OS}}, \quad (\text{П6.12})$$

где $T_{\text{расп}}$ - исходный (располагаемый) ресурс пропускной способности, которым обладает вновь изготовленный ОПН; $\bar{T}_{\text{расх}}$ - математическое ожидание расходуемого в процессе коммутаций ресурса. Численные значения N_S даны в табл.П6.3, а \bar{T}_{OS} определено с помощью построения, показанного на рис.П6.6.

Срок службы ОПН, определенный с доверительной вероятностью $P_{\text{дов}}$, равен:

$$N_{\text{сл}}(P_{\text{дов}}) = \frac{T_{\text{расп}}}{T_{\text{расх}}(P_{\text{дов}})} = \frac{T_{\text{расп}}}{\sum_S N_S T_{OS}(P_{\text{дов}})}, \quad (\text{П6.13})$$

где $T_{OS}(P_{\text{дов}})$ дается величиной T_{OS} , отвечающей $P_{\text{дов}}$, указанному в табл.П6.1.

Значения располагаемого ресурса задаются техническими условиями на ОПН. Численные значения $T_{\text{расп}}$ для ограничителей, изготавливаемых НПО "Электрокерамика" (Санкт-Петербург), приведены в табл.П6.6.

Таблица П6.6

Исходный (располагаемый) ресурс пропускной способности ОПН

$U_{\text{н}}$, кВ	110	220	330	500	750	1150
$T_{\text{расп}}$, отн.ед	97	26	17	22	ОПН-16	ОПНО-8 11

6.5. Программа расчета ожидаемого срока службы ограничителей 110-1150 кВ

Для оценки надежности работы ограничителей 110-1150 кВ, т.е. ожидаемого на заданном уровне доверительной вероятности срока безаварийной службы ОПН, защищающих от коммутационных перенапряжений конкретную электропередачу, в НИИПТ разработана программа расчета (РЕМА 1).

ПРИМЕР ВЫБОРА СИСТЕМЫ ГРОЗОЗАЩИТЫ ИЗОЛЯЦИИ ПИТАЮЩИХ КРУЭ БЛОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ (АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ)

Для того, чтобы проследить влияние различных элементов комплекса защитных средств, было выбрано наиболее неблагоприятное, с точки зрения перенапряжений, оперативное состояние электрической схемы КРУЭ 500 кВ, показанное на рис.П7.1, когда грозовая волна распространялась по линии ВЛ-2, а все другие присоединения, кроме БЛОКА-1, отключены. Такая ситуация может отвечать, например, пусковому этапу. Соответствующая расчетная схема будет иметь вид, показанный на рис.П7.2. Результаты расчетов, которые выполнялись по программе РВПМ и методам, изложенным в Части 3, суммированы в табл.П7.1.

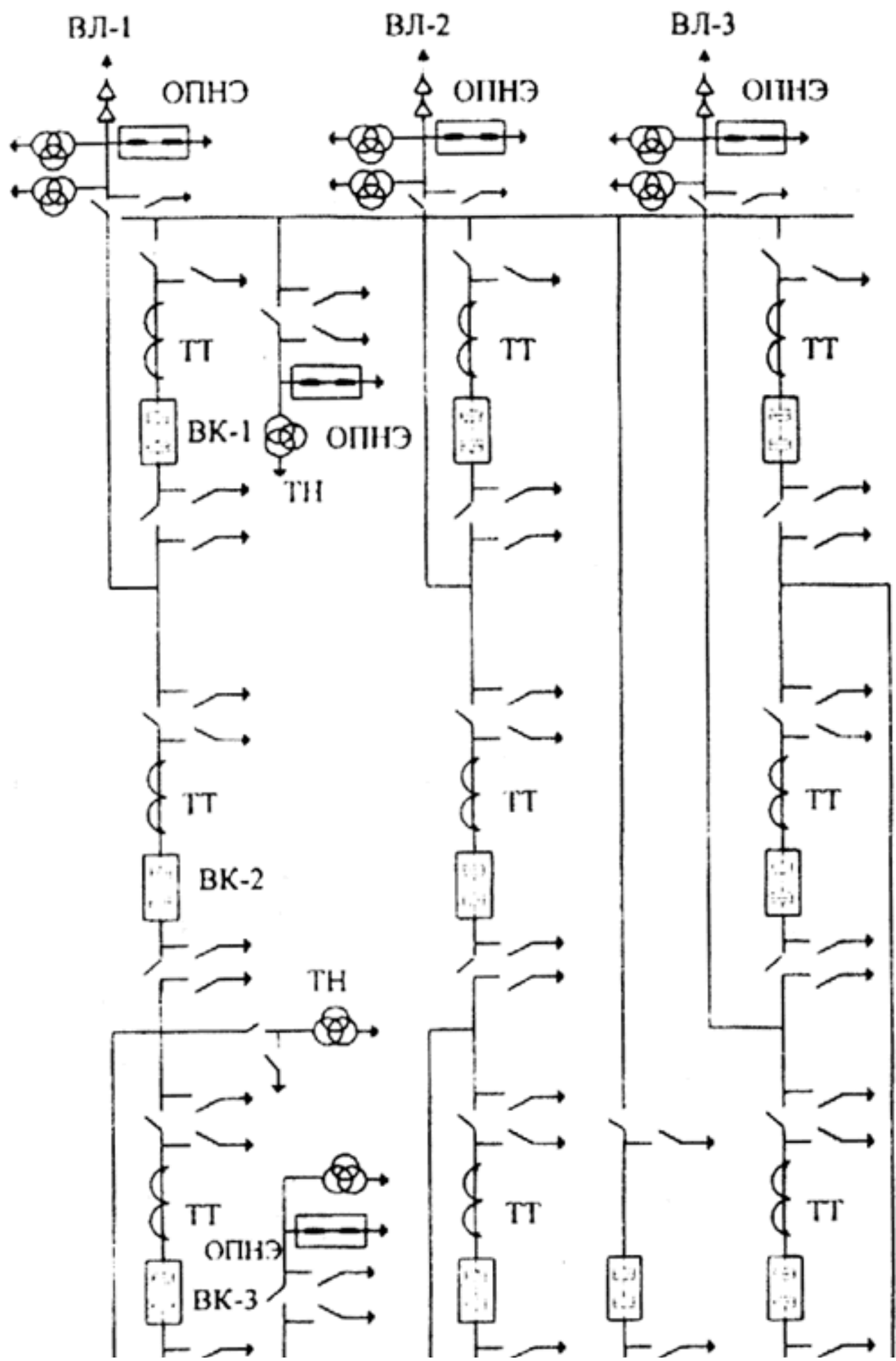


Рис.П7.1. Электрическая схема компоновки КРУЭ 500 кВ. Полупотрнная схема 3/2

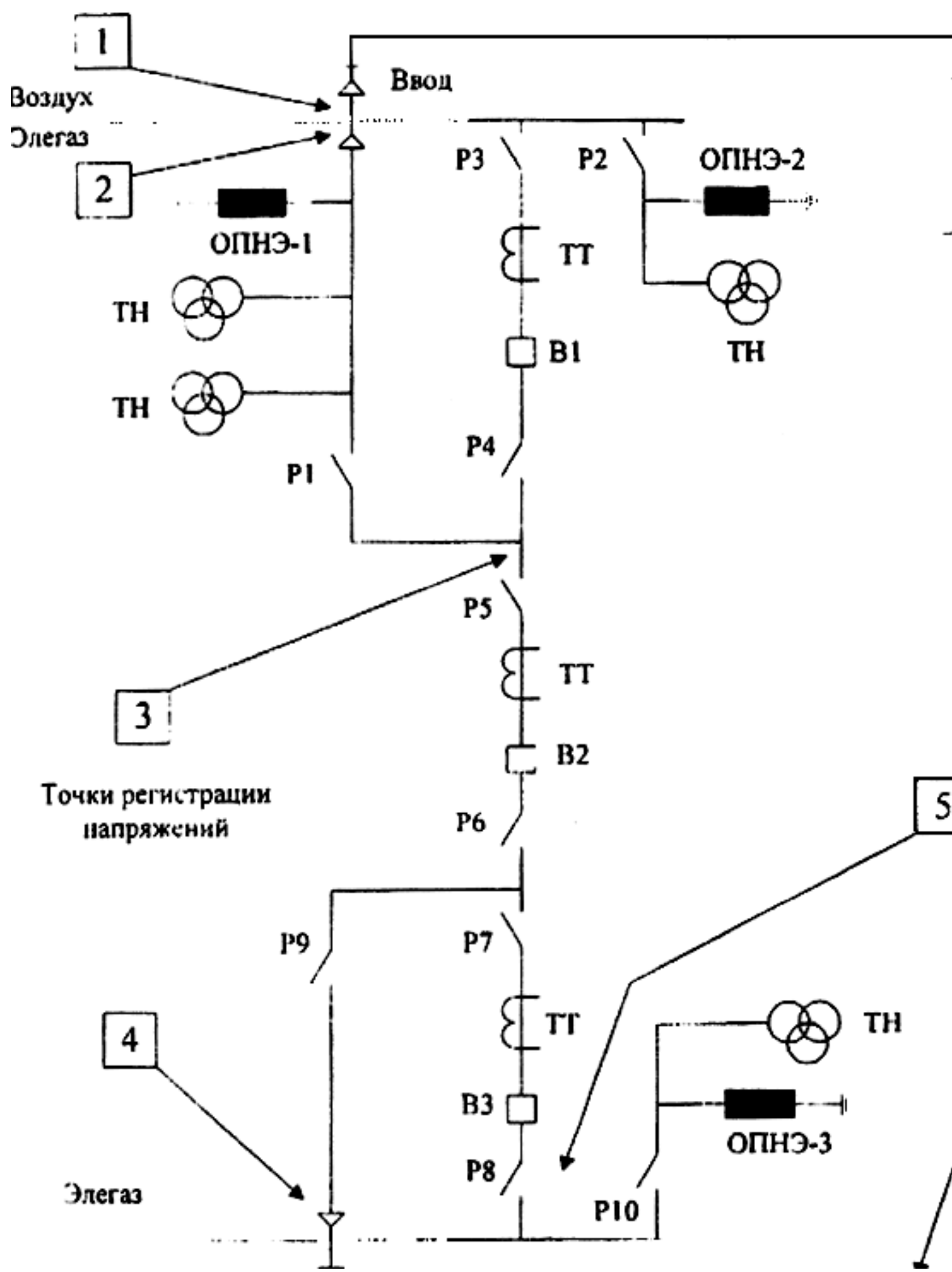
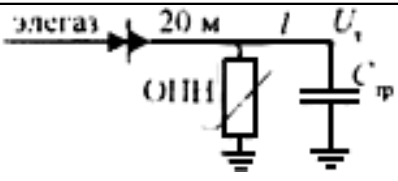
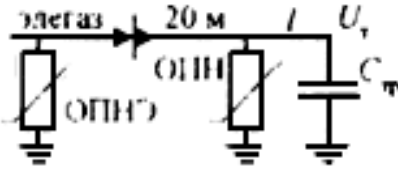
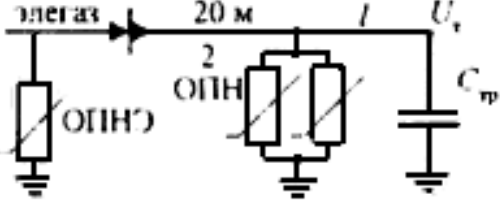
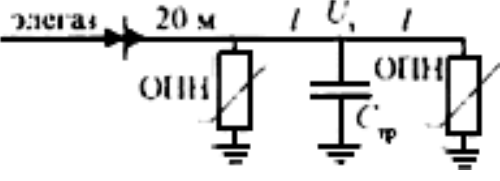


Рис.П7.2. Расчетная схема КРУЭ 500 кВ, отвечающая электрической схеме

Таблица П7.1

Грозовые перенапряжения, воздействующие на блочные трансформаторы КРУЭ 500 кВ

N схемы	Условное изображение схемы; l - расстояние ОПН - трансформатор	l , м	Входная емкость ($C_{тр}$) трансформатора, пФ		
			2,5	5,0	10,0
1		10	3,30	3,19	2,87
		15	3,51	3,35	3,03
2		10	2,79	2,84	2,86
		15	2,95	3,00	3,00
3		10	2,64	2,69	2,71
		15	2,79	2,84	2,86
4		10	2,69	2,67	2,44
		15	2,83	2,77	2,53

5		10	2,34	2,39	2,43
		15	2,44	2,49	2,52

Из табл.П7.1 видно, что при воздействии набегающих с ВЛ волн грозовых перенапряжений, наилучшие условия работы внутренней изоляции питающего КРУЭ блочного трансформатора обеспечиваются схемой N 5 табл.П7.1. В этой схеме защита осуществляется двумя ограничителями типа ОПН, установленными с двух сторон блочного трансформатора. При этом амплитуда воздействующих на трансформатор атмосферных перенапряжений U_T не превосходит (2,5-2,6) $U_{фм}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ОЖИДАЕМОГО СРОКА СЛУЖБЫ ОПН

ПРИМЕР П8.1. Расчет вынужденного напряжения переходного процесса

перенапряжений частоты 50 Гц

В качестве примера рассмотрим электропередачу 750 кВ, расчетная схема для определения симметричного и несимметричного вынужденного напряжения при всех коммутациях, кроме успешного ОАПВ, показана на рис.П2.1б, при коммутации успешного ОАПВ - на рис.П2.4б.

8.1.1. Исходные данные:

ВЛ $U_H = 750$ кВ длиной $l = 400$ км. Опоры с разрезанными тросами. Количество реакторов: на питающем конце - 1; на приемном конце - 1. Питающая схема с эквивалентным реактивным сопротивлением X для минимального и максимального режима по прямой и нулевой последовательности: $X_{1max}^{(1)} = 144$ Ом; $X_{1max}^{(0)} = 80$ Ом; . . . ; $X_{1min}^{(1)} = 100$ Ом; $X_{1min}^{(0)} = 54$ Ом; . . . ;

Приемная схема с эквивалентным реактивным сопротивлением X по прямой и нулевой последовательности: $X_2^1 = 100$ Ом; $X_2^{(0)} = 540$ Ом.

По табл.П2.1 и П2.2 для $U_H = 750$ кВ определяем $Z_W^{(1)} = 265$ Ом; $Z_W^{(0)} = 560$ Ом; $\lambda^1 = 1,08 \cdot 10^{-3} l = 1,08 \cdot 400 \cdot 10^{-3} = 0,432$ рад; $\lambda^0 = 1,768 \cdot 10^{-3} l = 0,707$ рад.

Реактивное сопротивление реакторов на питающем и приемном концах в схеме без нулевого реактора одинаково $X_P = 1880$ Ом.

Значения модулей векторов э.д.с. E зависят от вида коммутации. Примем для всех

коммутаций $E_{\min}=1,0$, а E_{\max} в соответствии с диапазоном, указанным в табл.1.5.

Для удобства расчетов и наглядности составим рабочую таблицу видов коммутаций для ВЛ 750, используя нумерацию видов из табл.П6.4.

Таблица П8.1

Таблица значений вынужденного напряжения на разомкнутом конце электропередачи в зависимости от E_{\max} и вида коммутации

S	Вид коммутации	E_{\max}	Тип режима	\bar{v}_p
1	Плановое включение ненагруженной линии	1,0	Симметричный	1,14
3	Успешное ОАПВ	1,15	Несимметричный	1,28
5	Разрыв передачи после неуспешного ОАПВ	1,15	Несимметричный	1,2
6	Трехфазный разрыв передачи вследствие ликвидации несимметричного к.з.	1,15	Несимметричный	1,2
7	Успешное ТАПВ	1,15	Симметричный	1,21
8	Неуспешное ТАПВ	1,15	Несимметричный	1,2
9	Разрыв передачи при асинхронном ходе	1,25	Симметричный	1,24

8.1.2. Расчет вынужденного напряжения переходного процесса в симметричном режиме

Для ВЛ 750 вынужденное напряжение вычисляется по формулам П2.2а на разомкнутом v_p и питающем v_{π} концах. По формуле П2.2б определим вспомогательные параметры, не зависящие от вида коммутации и значения э.д.с. E :

$$X_p = \frac{1880 \cdot 1880}{1880 + 1880} = 940 \text{ Ом.}$$

Для $X_1=144$ Ом:

$$\operatorname{tg} \varphi_p = \frac{1880 \cdot 1880 \cdot 144 - (1880 + 144) \cdot 265}{1880 \cdot 1880 \cdot 265} = 0,392 ;$$

$$\varphi_p=(0,374 \text{ рад}); \cos \varphi_p=0,931; \cos(\lambda + \varphi_p) =0,693.$$

Для $X_{1\min} = 100$ Ом определяя аналогично, получаем:

$$\varphi_p = (0,225 \text{ рад}); \quad \cos \varphi_p = 0,975; \quad \cos(\lambda + \varphi_p) = 0,791.$$

По формулам П2.2а определим максимальные и минимальные ненасыщенные значения вынужденного напряжения на разомкнутом и питающем концах для различных видов коммутаций и E_{\max} .

8.1.2.1. Коммутация планового включения

$$v_{p\max} = v_{pe2} = 1 \frac{0,931}{0,693} \frac{940}{144 + 940} = 1,165$$

$$v_{п\max} = v_{пе2} = 1,165 \cdot 0,908 = 1,057$$

$$v_{p\min} = v_{pe1} = 1 \frac{0,975}{0,791} \frac{940}{100 + 940} = 1,114$$

$$v_{п\min} = v_{пе1} = 1,114 \cdot 0,908 = 1,01$$

Поскольку $v_{пе2} < 1,15$, то учитывать насыщение не нужно, тогда $v_{pe2} = v_2$ и $v_{pe1} = v_1$.

Математическое ожидание \bar{v}_p и дисперсия σ^2 вынужденного напряжения при плановом включении ненагруженной линии на разомкнутом конце ВЛ 750 вычисляются по формулам П2.5а, П2.5б:

$$v_p = \frac{1,165 \cdot 1,114}{1,165 - 1,114} \ln \frac{1,165}{1,114} = 1,14$$

$$\sigma^2 = 3,55 \cdot 10^{-3}$$

8.1.2.2. Коммутация успешного ТАПВ

Поскольку E_{\min} для всех коммутаций принято одинаковым и равным единице, то $v_{p\min}$ также будет одинаковым и равным 1,114. Величина $v_{p\max}$ определяется так же, как в П2.1, но при значении $E - E_{\max} = 1,15$.

Получим:

$$v_{p\max} = v_{pe2} = 1,15 \frac{0,931}{0,693} \frac{940}{144 + 940} = 1,34$$

$$v_{п\max} = v_{пе2} = 1,34 \cdot 0,908 = 1,22$$

Поскольку $u_{\text{пе}2} = 1,22 > 1,15$, то необходим учет насыщения, который проводится с использованием формул П2.3в и кривых рис.П2.2, П2.3. Расчеты проведены при $Z_{\text{баз}} = 10$ кОм.

$$\varphi_2 = \arctg(1880/265) = 1,43 \text{ рад}; \quad \text{tg}(\lambda + \varphi_2) = -3,33;$$

$$X_{\text{рmax}} = \frac{144 \cdot 1880}{144 + 1880} = 133,75 \text{ Ом}; \quad \eta_2 = 13,8 \cdot 10^{-3}$$

По кривым рис.П2.3 при $\eta_2 = 13,8 \cdot 10^{-3}$ и $u_{\text{пе}2} = 1,22$ определяем верхний предел насыщенного значения $u_{\text{п}2} = 1,19$. По формуле П2.4 находим максимальное значение вынужденного напряжения на разомкнутом конце:

$$u_{\text{р}2} = \frac{u_{\text{п}2}}{\cos \lambda} = \frac{1,19}{0,908} = 1,31$$

При $u_{\text{р}1} = 1,114$ и $u_{\text{р}2} = 1,31$ определяем математическое ожидание вынужденного напряжения при коммутации успешного ТАПВ:

$$\bar{u}_{\text{р}} = \frac{1,31 \cdot 1,114}{1,31 - 1,114} \ln \frac{1,31}{1,114} = 1,21; \quad \sigma^2 = 6,4 \cdot 10^{-3}$$

8.1.2.3. Коммутация разрыва передачи при асинхронном ходе

Проводя вычисления, аналогичные приведенным выше, получаем $u_{\text{пemax}} = 1,32$, определяем насыщенное значение $u_{\text{пmax}}$ при $\eta_2 = 13,8 \cdot 10^{-3}$: $u_{\text{пmax}} = 1,26$; $u_{\text{рmax}} = 1,26/0,908 = 1,39$.

Математическое ожидание вынужденного напряжения $\bar{u}_{\text{р}} = 1,24$; дисперсия: $\sigma^2 = 0,01$.

8.1.3. Расчет вынужденного напряжения переходного процесса в несимметричном режиме

Определим коэффициент несимметрии $h_{\text{к}3}$ в начале $h_{\text{к}1}$ и в конце $h_{\text{к}2}$ линии при максимальной $X_{1\text{max}} = 144$ Ом и минимальной $X_{1\text{min}} = 100$ Ом реактивностях питающей системы.

Примем входные сопротивления, рассчитанные по параметрам прямой и обратной последовательности, равными $X_1^{(1)} \cong X_1^{(2)}$, тогда в соответствии с формулой (П2.9) $v_2 = 1$; $\varepsilon = 1/(2 + v_0)$. Формула (П2.8) примет следующий вид:

$$h_{к.з} = \sqrt{1 + \varepsilon(\nu_0 - 1 + \varepsilon(1 - \nu_0)^2)}$$

По формулам (П2.11) и (П2.13) определим вспомогательные параметры:

при $X_1 = 144$ Ом

$$X_1^{(0)} = \frac{80 \cdot 1880}{80 + 1880} = 76,7 \text{ Ом}, \quad X_1^{(1)} = 133,75 \text{ Ом};$$

при однополюсном к.з. в конце линии

$$\nu_0 = (76,7 \cdot 0,76 + 560 \cdot 0,65) / (133,75 \cdot 0,908 + 265 \cdot 0,419) = 1,817, \quad \varepsilon = 1 / (2 + 1,817) = 0,258,$$

$$h_{к2} \cong \sqrt{1 + 0,258(1,817 - 1 + 0,258(1 - 1,817)^2)} = 1,12,$$

при к.з. в начале линии

$$\nu_0 = 76,7 / 133,75 = 0,573; \quad \varepsilon = 1 / (2 + 0,573) = 0,389,$$

$$h_{к1} \cong \sqrt{1 + 0,389(0,573 - 1 + 0,389(1 - 0,573)^2)} = 0,928,$$

при $X_{\min} = 100$ Ом $X_1^0 = 52,5$ Ом, $X_1^1 = 94,95$ Ом;

при к.з. на конце линии $\nu_0 = 2,05$, $\varepsilon = 0,247$, $h_{к2} = 1,15$;

при к.з. в начале линии $\nu_0 = 0,55$, $\varepsilon = 0,392$, $h_{к1} = 0,925$.

Полученные четыре значения коэффициента несимметрии $h_{к.з}$ дают максимальные значения в зависимости от режима передачи и местоположения к.з. на линии. Для расчета минимального значения U_{\min} примем $h_{к.з} = 0,925$, для расчета максимального значения U_{\max} - $h_{к.з} = 1,12$.

Поскольку для коммутации с несимметричным режимом питания (разрыв передачи после неуспешного ОАПВ, трехфазный разрыв передачи вследствие ликвидации несимметричного к.з. и неуспешное ТАПВ) принято одинаковое значение $E = 1,15$, то величина U будет вычисляться следующим образом. Расчет U_P и U_{Π} при $E = 1$ (см в п.1.1, коммутация планового включения):

$$U_{P \min} = 1,114; \quad U_{\Pi \min} = 1,01;$$

$$U_{P \text{ек}1} = U_{P \min} \cdot h_{к1} = 1,114 \cdot 0,925 = 1,03; \quad U_{\Pi \text{ек}1} = U_{\Pi \min} \cdot h_{к1} = 0,934$$

При $E = 1,15$:

$$U_{\text{ре max}} = 1,165 \cdot 1,15 = 1,34;$$

$$U_{\text{пе max}} = 0,908 \cdot 1,34 = 1,22;$$

$$U_{\text{рек2}} = U_{\text{ре max}} \cdot k_{\text{к2}} = 1,34 \cdot 1,12 = 1,5;$$

$$U_{\text{пек2}} = U_{\text{пе max}} \cdot k_{\text{к2}} = 1,37$$

Поскольку $U_{\text{пек2}} > 1,15$, то необходим учет насыщения (см. п.1.2).

По кривым рис.П2.3 при $\eta_2 = 13,8 \cdot 10^{-3}$ и $U_{\text{пек2}} = 1,37$ определяем насыщенное значение вынужденного напряжения $U_{\text{пк2}} = 1,29$, тогда $U_{\text{рк2}} = 1,29/0,908 = 1,42$.

Для определения математического ожидания $\bar{U}_{\text{к.з}}$ на разомкнутом конце ВЛ примем $U_{\text{к1}} = 1,03$ и $U_{\text{к2}} = 1,42$, тогда $U_{\text{рк.з}} = 1,2$; $\sigma^2 = 0,022$.

8.1.4. Расчет вынужденного напряжения частоты 50 Гц в несимметричном режиме при успешном ОАПВ 8

Аналогично проведенным выше расчетам вычисляются максимальное U_{max} и минимальное U_{min} значения вынужденного напряжения, затем по формуле (П2.26) - математическое ожидание $\bar{U}_{\text{ОАПВ}}$. Ввиду большого объема вычислений подробный расчет проведем только для U_{max} , минимальное значение приведем без промежуточных вычислений.

По формулам П2.20, П2.21 и П2.16 определим вспомогательные параметры $m_{1,0}$, m и q :

по параметрам прямой последовательности электропередачи $X_{\text{P}} = 940$; $X_1 = 133,75$;
 $\cos \varphi_{\text{P}} = 0,975$; $\cos(\lambda - \varphi_{\text{P}}) = 0,795$; $\cos \varphi = 0,645$; $\cos(\lambda - \varphi) = 0,9$;

$$m_1 = 100 \cdot 0,645 \cdot 0,795 / (133,75 \cdot 0,975 \cdot 0,9) = 0,437;$$

по параметрам нулевой последовательности электропередачи $X_{\text{P}}^{(0)} = 940$; $X_1^{(0)} = 76,73$;
 $\cos \varphi_{\text{P}}^{(0)} = 0,923$; $\cos(\lambda - \varphi_{\text{P}}^{(0)}) = 0,999$; $\cos \varphi^{(0)} = 0,141$; $\cos(\lambda - \varphi^{(0)}) = 0,542$; m_0
 $= 54 \cdot 0,141 \cdot 0,999 / (76,73 \cdot 0,923 \cdot 0,542) = 0,198$;

$$m = (54 \cdot (1 + 0,198) \cdot 0,437) / (100 \cdot (1 + 0,437) \cdot 0,198) = 0,994;$$

$$q = 1 - (1/1 + 2 \cdot 0,994) \cdot ((1/1 + 0,437) - (0,994/1 + 0,198)) = 1,045.$$

По формуле П2.24 определяем максимальное значение угла Θ_2 при $t_{\text{ОАПВ}} = 0,6$ с, вычислив предварительно значение аргумента функции \arcsin :

$$\left[\frac{0,8}{1 \cdot 1,114} \frac{144 + 940}{940 \cdot 265} \frac{0,795}{0,975} \cdot 100 + 133,75 \frac{0,9 \cdot 0,975}{0,795 \cdot 0,645} \right] = [0,839]$$

$$\arcsin(0,839) = 57^\circ;$$

$$\Theta_2 = 5,7 + (1 + 0,17 \cdot 0,6) \cdot 57 = 68,5^\circ; \quad \cos \Theta_2 = 0,366.$$

Проведя аналогичные расчеты для X_{\min} и E_{\min} , получаем:

$$q_{\min} = 1,034; \quad \Theta_1 = 40,17^\circ; \quad \cos \Theta_1 = 0,764.$$

Подставив полученные значения в формулу П2.25, получаем:

$$v_{\min} = \sqrt{1,034^2 \cdot 1,114^2 + 0,034^2 \cdot 1 + 2 \cdot 1,034 \cdot 0,034 \cdot 1,114 \cdot 1 \cdot 0,036} = 1,165$$

$$v_{\max} = \sqrt{1,045^2 \cdot 1,31^2 + 0,045^2 \cdot 1,15^2 + 2 \cdot 1,045 \cdot 0,045 \cdot 1,31 \cdot 1,15 \cdot 0,764} = 1,41$$

Математическое ожидание вынужденного напряжения при успешном ОАПВ равно (см. формулу П2.26) $\bar{v}_p = 1,41 \cdot 1,165 \cdot \ln(1,41/1,165) / (1,41 - 1,165) = 1,28$; дисперсия

(см. формулу П2.5б) $\sigma^2 = 0,0043$.

8.2. Расчет ожидаемого срока службы ОПН 750 кВ

8.2.1. Расчет статистического распределения амплитуд неограниченных перенапряжений в точке установки ограничителя

Произведем расчет для ограничителя, установленного на разомкнутом конце электропередачи. Используя значения математического ожидания вынужденного напряжения \bar{v}_p , вычисленные для всех видов коммутаций в предыдущем примере, значения параметров ударных коэффициентов из табл.П6.4, рис.П6.3, П6.4, с помощью кривой рис.П6.5 и формул П6.4-П6.6, вычислим зависимости $P_s(k)$ - распределение амплитуд неограниченных перенапряжений.

Для коммутаций, ударные коэффициенты которых не зависят от времени ($S = 1; 3; 5; 6; 9$) распределения амплитуд неограниченных перенапряжений $P_s(k)$ определяются одинаково. Покажем расчет на примере коммутации $S = 1$ плановое включение ненагруженной линии.

Для этой коммутации имеем:

$$\bar{v}_p = 1,14; \text{ из табл.П6.4 - } \bar{N} = 1,61; \quad \sigma_N = 0,183.$$

Подставляя эти значения в формулу П6.4а, получаем:

$$P_1(k) = P \frac{k - \bar{N} \bar{v}}{\bar{v} \sigma_N} = P \frac{k - 1,835}{0,209}$$

Значения аргумента, обозначим его Y , определяют по кривой рис.П6.5 при заданном значении функции $P(Y)$. Например, для $P(Y)=0,5$ получим $Y=0$, тогда $k=0,209 \cdot Y + 1,835$. Таким образом, определяются значения k в диапазоне изменения $P(Y)$ от 0 до 1 и строится зависимость $P_1(k)$, показанная на рис.П8.1.

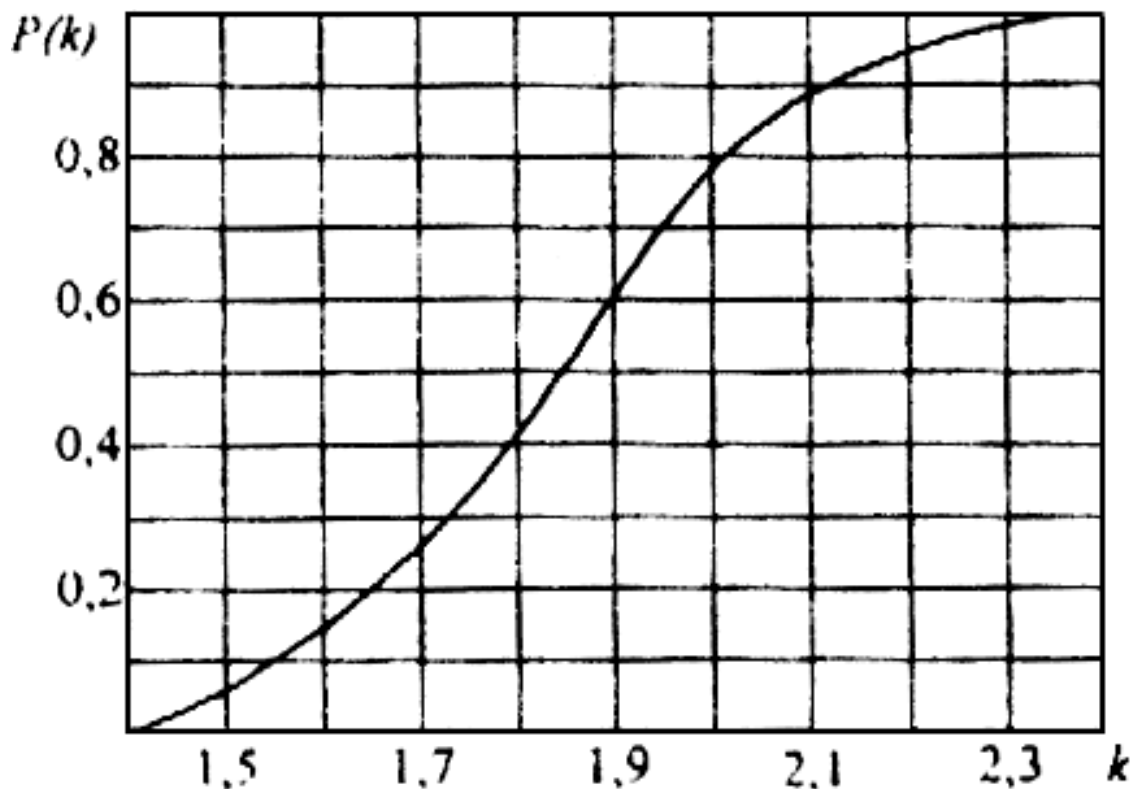


Рис.П8.1. Зависимость $P(k)$ для коммутации планового включения

Для коммутации N 7 (успешное ТАПВ) значения ударных коэффициентов N и σ_N зависят от величины бестоковой паузы $t_{АПВ}$ и определяются по кривым рис.П6.3. Для принятой величины $t_{АПВ}=0,6$ с получим $N=1,64$; $\sigma_N=0,28$ (см. предыдущий пример). В остальном процедура построения $P_7(k)$ аналогична приведенной выше.

Для коммутации N 8 (неуспешное ТАПВ) методика построения зависимости $P_8(k)$ следующая. Для известной паузы $t_{АПВ}=0,6$ с по кривым рис.П6.4. определяют параметры двух функций $P(k)_-$ и $P(k)_+$: $N_- = 1,62$; $\sigma_- = 0,25$; $N_+ = 1,1$; $\sigma_+ = 0,34$.

Подставляя полученные значения параметров в формулы П6.5 и задавая значения k , например, в диапазоне 1,4-2, по кривой рис.П6.5 определяем две вспомогательные функции

$P(k)_-$ и $P(k)_+$. Подставляя полученные значения $P(k)_-$, $P(k)_+$ в формулу П6.6, получим распределение амплитуд неограниченных перенапряжений при неуспешном ТАПВ.

Для примера определим значение $P(k)$ при $k=1,8$. Найдем:

$$P(1,8)_- = P\left(\frac{1,8 - 1,22 \cdot 1,62}{1,22 \cdot 0,25}\right) = P(-0,58) = 0,26 ;$$

$$P(1,8)_+ = P\left(\frac{1,8 - 1,22 \cdot 1,1}{1,22 \cdot 0,34}\right) = P(1,1) = 0,86 ;$$

$$P(1,8) = 0,55 \cdot 0,26 + 0,85 \cdot 0,86 = 0,87$$

Аналогичным образом строится зависимость $P(k)$ в диапазоне от 0 до 1.

8.2.2. Расчет статистического распределения ресурса, расходуемого резистором ОПН в течение одного года

Зависимость между амплитудой неограниченных перенапряжений k и величиной расходуемого ресурса T_{os} дается формулой П6.10. Для ОПН 750 кВ эта формула имеет вид:

$$k = 1,75 \cdot T_{os}^{0,0114} + T_{os}^{0,286}$$

Решение этого уравнения для нахождения T_{os} достаточно трудоемкая задача, поэтому удобнее пользоваться графической зависимостью $T_{os}(k)$, представленной на рис.П8.2.

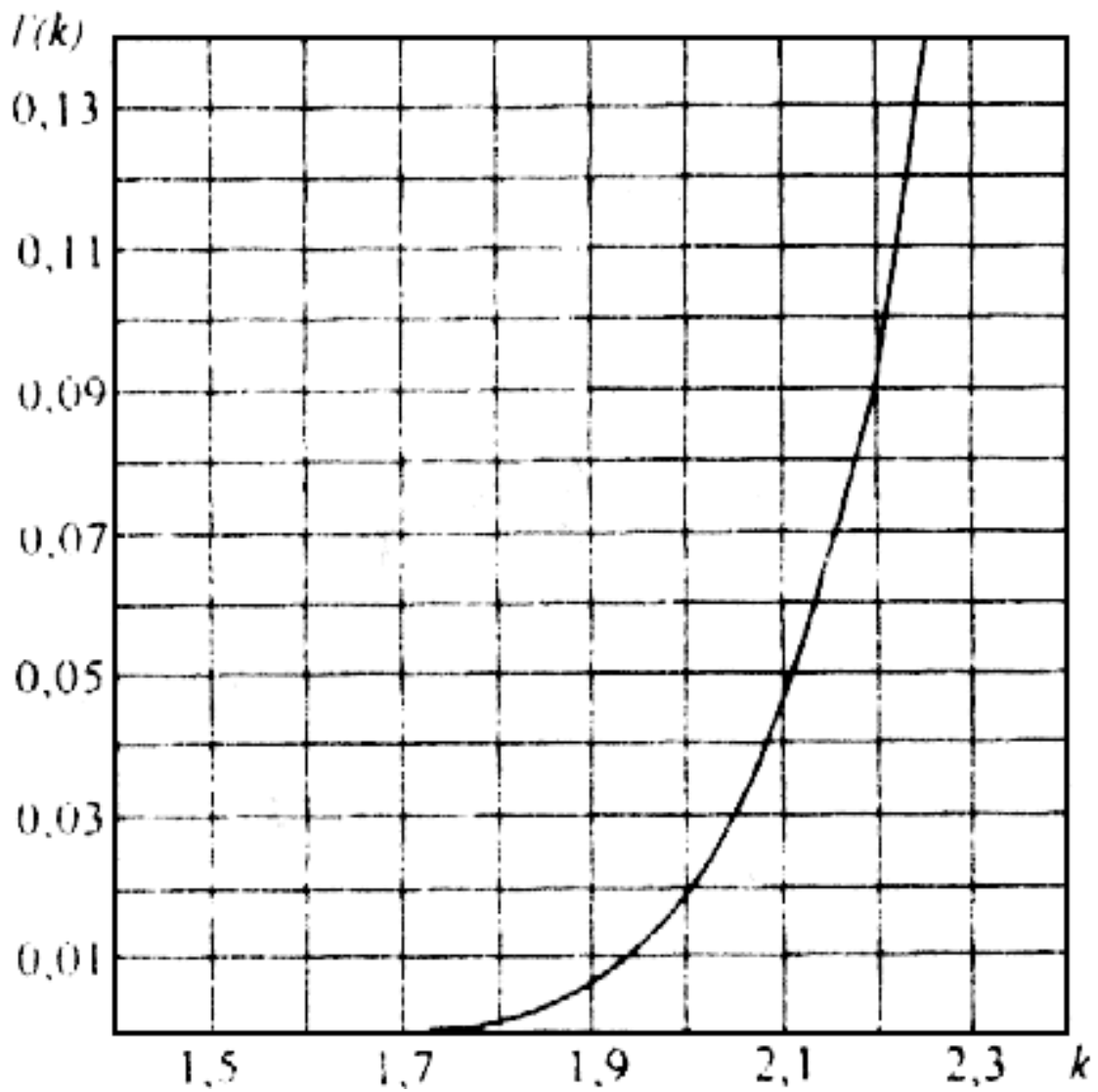


Рис.П8.2. Зависимость $T(k)$ для ОПН-750 кВ

Используя полученные зависимости $P_s(k)$ и $T_{os}(k)$, получаем искомые функции $P_s(T_{os})$ статистического распределения ресурса пропускной способности, расходуемого резистором ОПН в рассматриваемых коммутациях. Для коммутации $S=1$ процесс построения и полученная зависимость $P_s(T_{os})$ приведены на рис.П8.3. На этом же рисунке показан способ графического определения математического ожидания расходуемого ресурса \bar{T}_{os} в данной коммутации. Величина $\bar{T}_{os}=0,019$.

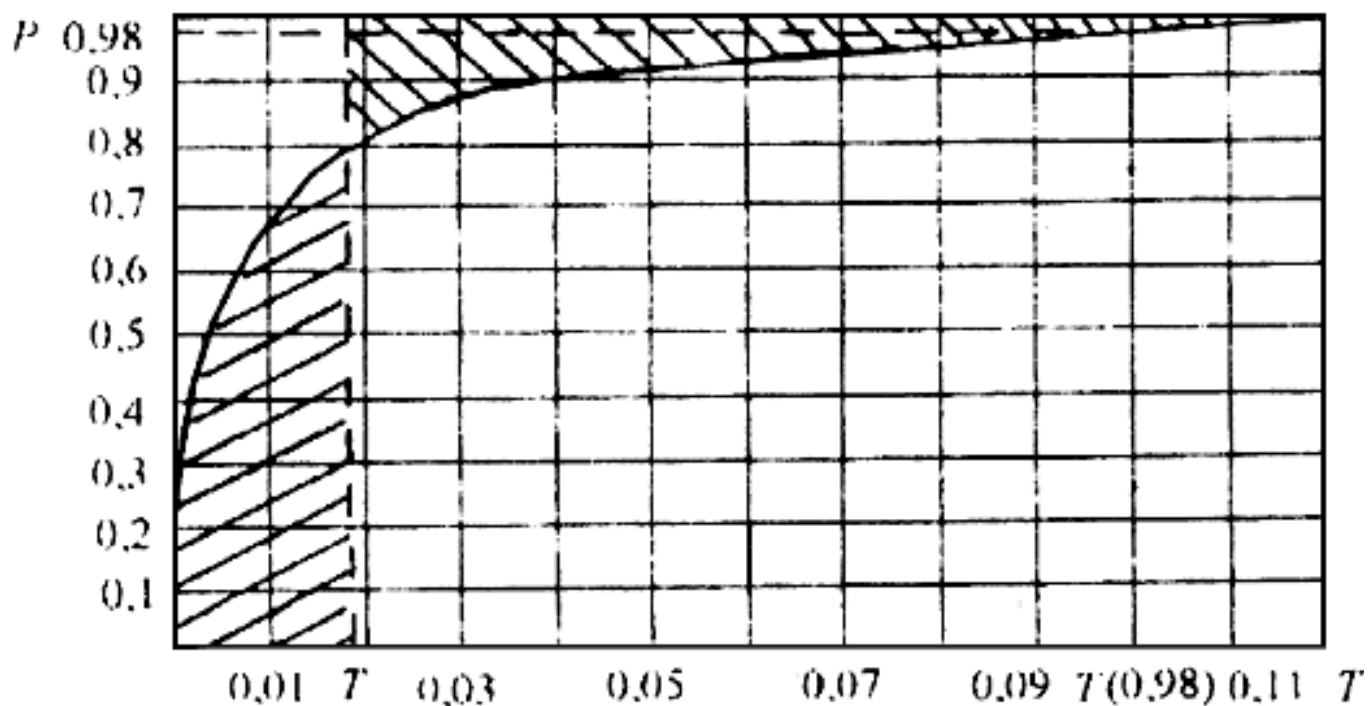


Рис.П8.3. Зависимость $P(T)$ для коммутации планового включения. Зависимость строится на основании

кривых рис.П8.1 и П8.2. Например: вероятности $P=0,8$ на рис.П8.1 соответствует $k=2$, этому значению k на кривой рис.П8.2 соответствует $T=0,002$. Следовательно, на рис.П8.3 искомая точка будет иметь координаты $P=0,8, T=0,02$

Для остальных коммутаций определенные аналогичным образом значения \bar{T}_{os} приведены в следующей таблице П8.2, где также даны величины ожидаемых количеств воздействий N_s на резистор одной фазы ОПН в год для ВЛ 750 кВ длиной 400 км и величины расходуемого ресурса, определенные при $P=0,98$.

Таблица П8.2

S	Вид коммутации	N_s	\bar{T}_{os}	$N_s T_{os}$	$T_{os}(0,98)$
1	Плановое включение ненагруженной линии	3	0,019	0,057	0,1
3	Успешное ОАПВ	0,48	0,05	0,024	0,185
5	Разрыв передачи после неуспешного ОАПВ	2,44	0,002	0,0049	0,016
6	Трехфазный разрыв передачи вследствие ликвидации несимметричного к.з.	0,4	0,001	0,0004	0,008

7	Успешное ТАПВ	0,1	0,18	0,018	0,67
8	Неуспешное ТАПВ	0,05	0,0004	0,00002	0,004
9	Разрыв передачи при асинхронном ходе	0,02	0,03	0,0006	0,16

Суммируя данные предпоследнего столбца табл.П8.2, определим, в соответствии со знаменателем формулы П6.12, математическое ожидание ресурса $\bar{T}_{расх}$, расходуемого во всех коммутациях в течение одного года. В данном примере величина $\bar{T}_{расх}$ равна 0,105 о.е., определенное по формуле П6.12 математическое ожидание срока службы ОПН-750 составит $\bar{N}_{сл} = 16/0,105 = 152$ года. Срок службы ОПН-750, оцененный с доверительной вероятностью $P_{дов} = 0,98$, определяется по формуле П6.13. Величины расходуемого ресурса, отвечающие вероятности $P = 0,98$, определенные по кривым $P_s(T_{ос})$, аналогичным рис.П8.3, приведены в последнем столбце табл.П8.2. Умножив $T_{ос}(P = 0,98)$ на N_s и просуммировав по всем коммутациям, получаем величину расходуемого ресурса, которая с вероятностью 0,98 не будет превышена в течение одного года работы ОПН. Для данного ОПН-750 получим $T_{расх}(P = 0,98) = 0,504$ о.е., $N_{сл} = 16/0,504 = 32$ года, т.е. срок службы, оцененный с доверительной вероятностью 0,98, составит не менее 32 лет.

Все приведенные выше оценки сделаны для ОПН, установленного на разомкнутом конце электропередачи. Если провести аналогичные расчеты для ограничителя, установленного на питающем конце, то срок службы, оцененный с доверительной вероятностью 0,98, составит не менее 98 лет. В данном случае разумно использовать на питающем конце электропередачи ограничитель ОПНО-750. Для ОПНО-750 величина располагаемого ресурса (по данным завода-изготовителя) равна: $T_{расп} = 8$ о.е. Тогда срок службы ОПНО-750, оцененный с доверительной вероятностью 0,98, составит не менее 49 лет.

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МЭК ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕГАЗОВЫХ КРУ И ВСТРАИВАЕМОГО В НИХ ОБОРУДОВАНИЯ

1. Рекомендуемые МЭК испытательные напряжения приведены в табл.П9.1.
2. Защитные характеристики элегазовых ограничителей типа ОПНЭ и серийных типа ОПН-УХЛ1 или типа ОПН-У1 должны быть идентичны. Эти характеристики приведены в табл.П4.1 Приложения 4.

Таблица П9.1

Рекомендуемые МЭК испытательные напряжения элегазовых КРУ и встраиваемого в них оборудования

Грозовой импульс 1,5/40 мкс, кВ	Коммутационный импульс 1,2/2,5 мс,	Напряжение частоты 50 Гц,
---------------------------------	------------------------------------	---------------------------

$U_{ном}$, кВ				кВ		кВ, 60 с				
	полный		срезанный	относительно земли*	между контактами выключателя и разъединителя	относительно земли и между полюсами**		между контактами		
	Относительно земли и между полюсами	между контактами	электромагнитные трансформаторы напряжения			КРУ Э	измерительные трансформаторы и вводы, испытываемые отдельно	выключатели	разъединители	
		выключатели	разъединители							
110	550		630	550	-	-	230	230	230	265
220	950		1050	950	-	-	395	395	325	375
330	1175	1380		1175	950**	1095	450	510	575	
500	1425	1725		1425	1175*	1330	620	630	815	
750	2100	2550		2100	1425*	2000	830	830	1240	

* - для вводов "воздух-элегаз" категории размещения I в сухом состоянии и под дождем;

** - требование к изоляции между полюсами только для классов напряжения 110 и 220 кВ.

ЧАСТЬ 2

ЗАЩИТА ОТ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-35 кВ

РАЗДЕЛ 5. ЗАЩИТА ОТ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ СЕТЕЙ 6-35 кВ

5.1. Исходные положения

Работающие с незаземленной эффективно нейтралью сети напряжением 6-35 кВ должны иметь изолированную резонансно заземленную либо резистивно заземленную нейтраль.

Основным защитным мероприятием в сетях 6-35 кВ является компенсация емкостных токов замыкания на землю с помощью дугогасящего реактора (ДГР). Установка ДГР служит, в первую очередь, для защиты от действия заземляющей дуги (от термического повреждения оборудования и перехода дуги на другие фазы), но одновременно снижает перенапряжения дуговых замыканий на землю.

В воздушных и смешанных сетях с компенсацией емкостных токов должны быть выполнены мероприятия против резонансного повышения напряжения при появлении в сети емкостной несимметрии и при неполнофазных коммутациях.

В сетях 6-35 кВ с изолированной или резонансно заземленной нейтралью внутренние перенапряжения обычно не опасны для изоляции, поэтому в применении специальных защитных мероприятий, за редким исключением, нет необходимости, но отказ от защиты должен быть обоснован. Вместе с тем, нельзя исключить ухудшения (например, старения) изоляции в периоды между очередными эксплуатационными профилактическими испытаниями, поэтому для повышения надежности работы изоляции сетей, прежде всего, состаренной в процессе многолетней эксплуатации, целесообразно в конкретных условиях эксплуатации предусматривать дополнительные средства ограничения внутренних перенапряжений (установка ОПН, демпфирующих RC-цепочек, резисторов в нейтрали и др.).

Обязательной является защита от перенапряжений, возникающих при коммутации малых индуктивных токов вакуумными выключателями.

В сетях 6-35 кВ должны быть приняты меры по предотвращению или снижению вероятности опасных резонансных и феррорезонансных колебаний.

Осциллограммы, иллюстрирующие феррорезонансные колебания, показаны на рис.5.1. Этот режим возник в действующей сети 35 кВ после отключения однофазного металлического замыкания на землю. Показанные на рис.5.1 колебания относятся к классу так называемых почтипериодических режимов.

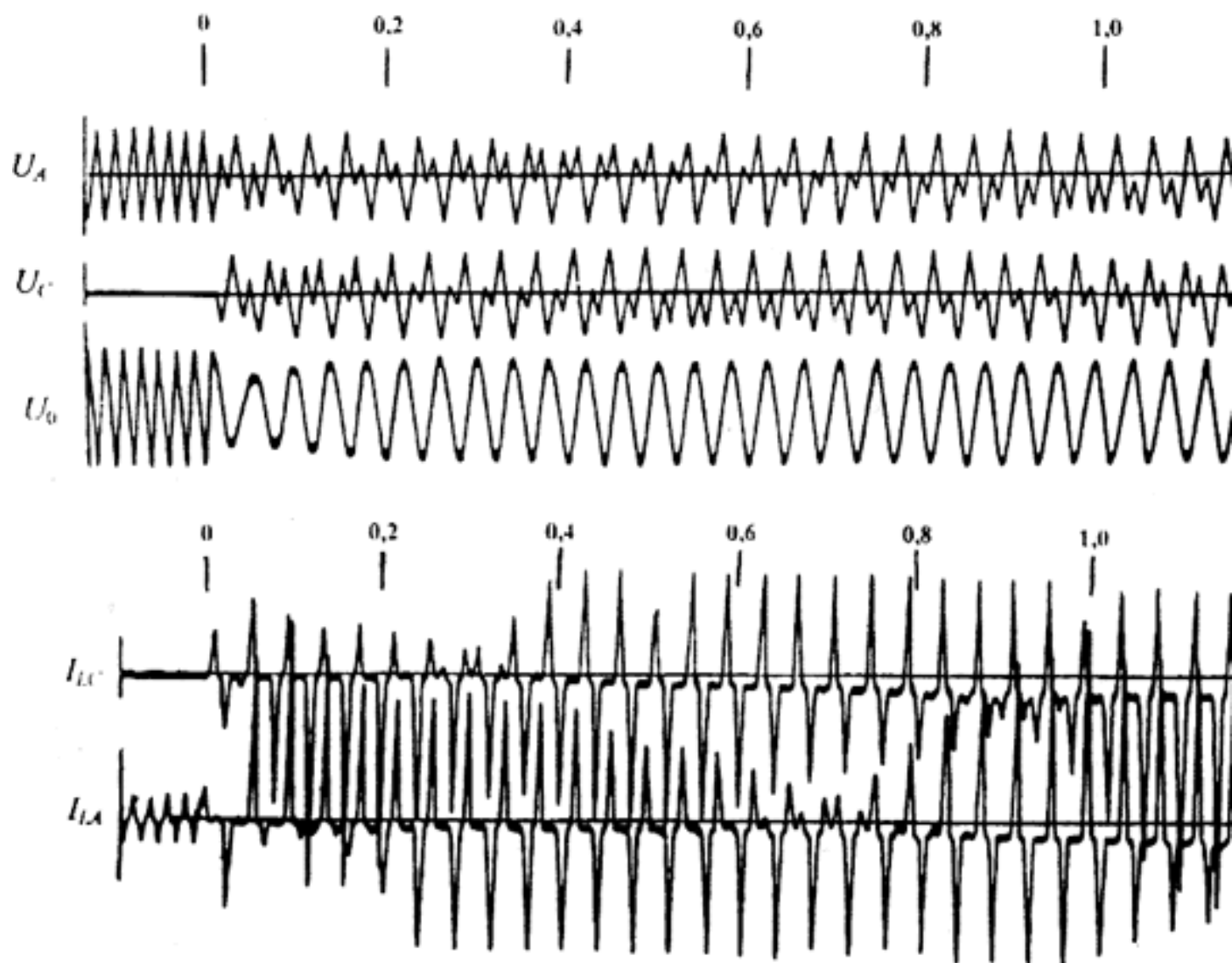


Рис.5.1. Осциллограмма феррорезонансных почтипериодических колебаний

Действующая сеть 35 кВ. Длина ВЛ 25 км; два ЗНОМ-35

Амплитуды перенапряжений, возникающих в режимах почтипериодических колебаний обычно опасности для изоляции ТН не представляют. Однако, как показала расшифровка осциллограмм, приведенных на рис.5.1, зачастую они сопровождаются большими многократно повторяющимися и длительно (в течение нескольких секунд) действующими бросками тока в обмотках, поэтому такие режимы могут стать причиной термического повреждения ТН.

Так, в процессе феррорезонансных почти периодических колебаний, приведенных на рис.5.1, амплитуды этих бросков достигали 300-500 мА, что в 5-8,5 раз превышает допустимые по нагреву токи.

Почтипериодичность этих режимов связана с наличием в потокосцеплении ТН аperiodической составляющей, происхождение которой, по-видимому, вызвано повторными пробоями промежутка после отключения к.з.

Всегда требуется защита неиспользуемых обмоток трансформаторов от электростатических и электромагнитных влияний.

Допустимые кратности перенапряжений на электрооборудовании сетей 6-35 кВ указаны в Приложении 10.

5.2. Компенсация емкостного тока на землю

Вопрос о необходимости применения ДГР и о его мощности решается на основе расчета или измерения величины емкостного тока замыкания на землю. Дугогасящие аппараты для компенсации емкостного тока замыкания на землю должны устанавливаться, если его величина превышает следующие значения:

Номинальное напряжение сети, кВ	6	10	15-20	35
Емкостной ток замыкания на землю, А	30	20	15	10

В сетях 6-35 кВ с ВЛ на железобетонных или металлических опорах дугогасящие аппараты должны устанавливаться при емкостном токе замыкания на землю более 10 А. В сетях 6-35 кВ с повышенными требованиями к электробезопасности (сети открытых горных и торфяных разработок, шахтных и т.п.) компенсация требуется при емкостном токе 5 А и более.

Как правило, ДГР должны иметь автоматическую настройку компенсации, чтобы в нормальном режиме напряжение несимметрии не превышало 0,75% фазного напряжения.

При отсутствии в сети замыкания на землю допускается напряжение не выше 15% фазного напряжения длительно и не выше 30% в течение 1 ч. Если напряжения несимметрии и смещения нейтрали превышают указанные значения, то снижение их должно быть осуществлено выравниванием емкостей фаз относительно земли, например, транспонированием линий на шинах подстанций. Запрещаются пофазные включения и отключения воздушных и кабельных линий, если это может привести к напряжению смещения нейтрали, превышающему указанные значения.

ДГР и нейтраль трансформатора, к которой подключен реактор, должны быть защищены ОПН от перенапряжений, обусловленных срезом тока в ДГР при отключении двухфазных коротких замыканий на землю, когда на шинах трансформатора остается маленькая емкость.

ОПН устанавливается также, если наибольший ток ДГР $I_p \geq 30I_c$, где I_c - емкостный ток замыкания на землю на шинах после отключения к.з.; при этом перенапряжения не превзойдут $3U_\phi$.

Отключение и включение холостого трансформатора, к нейтрали которого подключен ДГР, можно производить только после отключения реактора, так как неодновременность размыкания или замыкания контактов выключателя (разъединителя) может привести к появлению опасных перенапряжений, возникающих вследствие пофазной компенсации емкостей сети.

5.3. Защита от дуговых перенапряжений в сетях 6-35 кВ

5.3.1. Релейная защита целесообразна для уменьшения длительности замыкания на землю и исключения поиска "земли" методом поочередного отключения и включения элементов сети, связанным с дополнительными воздействиями перенапряжений. Рекомендуется оснащение всех присоединений устройствами релейной защиты от однофазных замыканий, удовлетворяющими следующим основным требованиям:

- устройства должны реагировать на устойчивые повреждения и повреждения, сопровождающиеся перемежающейся дугой;
- устройства должны селективно определять направление до места однофазного замыкания;

- работа устройства не должна зависеть от эксплуатационных режимов сети.

При этом устройства защиты могут действовать на отключение без выдержки времени, на отключение с выдержкой времени (по условиям селективности, технологии и др.) или на сигнал; либо устройство защиты, отключающее элемент с однофазным замыканием, должно действовать с минимальной выдержкой времени в установках, где отключение "земли" необходимо по требованиям техники безопасности.

5.3.2. В сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью дуговые перенапряжения для нормальной изоляции опасности не представляют, однако для повышения надежности работы изоляции, ослабленной по разным причинам (старение и др.) могут использоваться ОПН. Особенно эффективно их применение совместно с резистором в нейтрали, при этом необходимо исходить из следующих условий:

- защитные характеристики ОПН должны быть скоординированы с уровнем изоляции защищаемого объекта (трансформатора, двигателя, кабеля, КРУ);

- допустимые напряжения частотой 50 Гц для ОПН по величине и длительности должны соответствовать возможному повышению напряжения в сети;

- пропускная способность ОПН должна соответствовать всем возможным в сети токовым воздействиям с учетом их длительности. Оптимальный выбор параметров и место его установки могут быть сделаны только с помощью расчетов перенапряжений и токовых воздействий на ОПН.

5.3.3. Когда отрицательные последствия от внезапного аварийного отключения поврежденного элемента с однофазным замыканием менее тяжелы, чем последствия от длительного протекания тока замыкания или перехода в междуфазное короткое замыкание, по местным условиям может оказаться целесообразно заземлить нейтраль через резистор и отключать присоединение с "землей" с минимальной выдержкой времени. Такая ситуация может иметь место в тех распределительных или промышленных сетях, а также в тех сетях собственных нужд электростанций, где наблюдаются частые переходы однофазных замыканий в междуфазные и двойные, возникают трудности с компенсацией емкостных токов из-за значительного остаточного тока высших гармоник, где отключение поврежденного элемента не наносит ущерба при наличии резерва.

В сети с высокоомным резистивным заземлением предполагается включение в нейтраль резистора, сопротивление которого одного порядка с емкостным сопротивлением всех фаз сети на землю, при этом существенно снижаются дуговые и феррорезонансные перенапряжения.

5.4. Система защиты от однофазных замыканий и перенапряжений в сети собственных нужд с резистивным заземлением нейтрали и двумя типами ОПН

Для сетей с резистивным заземлением нейтрали, в которых допускается аварийное отключение поврежденного присоединения с однофазным замыканием, может быть

использована схема с двумя ограничителями ОПН¹ и ОПН², имеющими различные уровни защиты. Схема такой защиты применительно к сети собственных нужд 6 кВ приведена на рис.5.2. В систему защиты, кроме резистора, входит селективная защита от замыкания на землю, действующая на отключение, и два комплекта ограничителей перенапряжений с

разными уровнями защиты. Активный ток замыкания на землю создается резистором $R_N \approx 100$ Ом. На всех присоединениях секции собственных нужд 6 кВ устанавливается токовая ненаправленная защита от замыканий на землю, действующая на отключение без выдержки времени. Селективность ее определяется тем, что активный ток протекает только через поврежденное присоединение. Через остальные присоединения протекает лишь собственный

емкостной ток нулевой последовательности, от которого защита отстраивается.

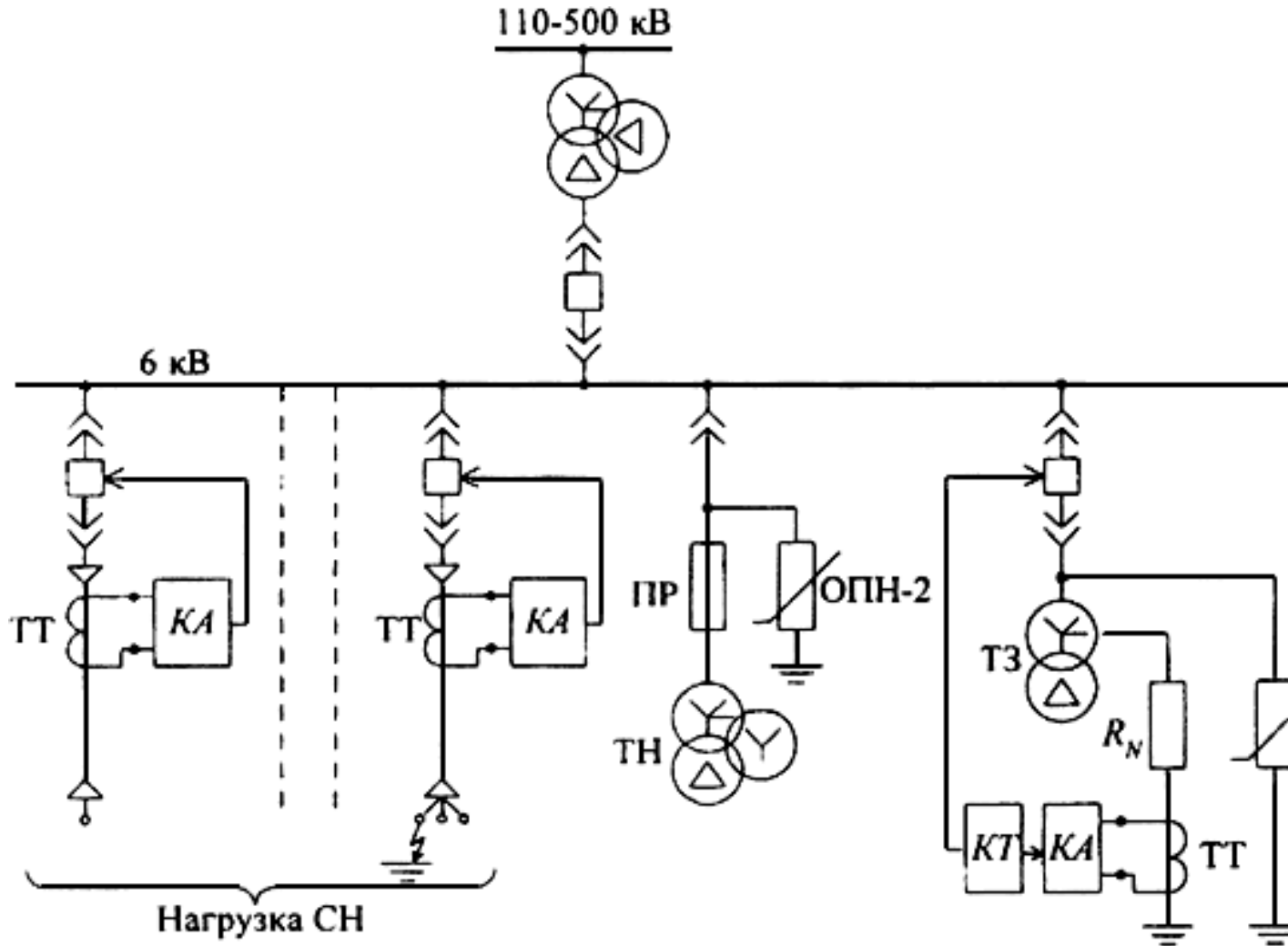


Рис.5.2. Система защиты от перенапряжений в сети СН с резисторным заземлением нейтрали и двумя типами ОПН

$R_N = 100$ Ом - резистор; ТТ - трансформатор тока нулевой последовательности;

КА - токовое реле; КТ - реле времени; ОПН - ограничители перенапряжений;

ТН - трансформатор напряжения; ПР - предохранитель; ТЗ - трансформатор заземляющий

При отказе токовых защит присоединений или при однофазных замыканиях на шинах

действует защита, подключенная к трансформатору тока в цепи резистора R_N . Эта защита с временем 0,5 с действует на отключение заземляющего трансформатора вместе с резистором

и ОПН¹, поэтому в схеме исключено длительное существование большинства однофазных замыканий, что благоприятно сказывается на работе оборудования, а также исключено

длительное воздействие линейного напряжения на ОПН¹, установленный у заземляющего трансформатора. Кроме того, перенапряжения от заземляющих дуг ограничены резистором в

нейтрали до уровня ниже $2,4 U_{\phi}$. Все это создает достаточно легкие условия работы ОПН¹, который должен длительно выдерживать только фазное напряжение сети, поэтому его

защитные характеристики могут быть выбраны приблизительно на уровне $2,0 U_{\Phi}$.

В редких случаях отказа токовых защит присоединений или возникновения однофазного замыкания на шинах сеть переходит в режим работы с изолированной нейтралью и остается под защитой ОПН², который должен быть рассчитан на длительное воздействие линейного напряжения; поэтому этот ограничитель имеет защитные характеристики $(2,9-3,0) U_{\Phi}$, худшие по сравнению с ОПН¹. В подавляющем большинстве случаев при нормальной работе защиты удается обеспечить уровень ограничения перенапряжений примерно до $(2,1-2,3) U_{\Phi}$. При отказе токовых защит присоединений, когда ограничение перенапряжений осуществляется ОПН², воздействующие на оборудование перенапряжения увеличиваются примерно до $(2,6-3,0) U_{\Phi}$. Описанная система защиты, помимо собственных нужд электрических станций, может быть применена и в других сетях 6-10 кВ.

5.5. Защита от повреждений трансформаторов напряжения 6-35 кВ контроля изоляции

Радикальным мероприятием, исключающим повреждения трансформаторов напряжения контроля изоляции, является использование "антирезонансных" трансформаторов напряжения (НАМИ-6, НАМИ-10 и НАМИ-35). Эти трехфазные трансформаторы имеют особую схему соединения обмоток и пониженную номинальную индукцию. Описание и схема соединения обмоток "антирезонансных" трансформаторов напряжения типа НАМИ даны в Приложении 11.

При использовании трансформаторов напряжения других типов (НТМИ-6, НТМИ-10, 3хЗНОМ-35) для предотвращения их повреждений от феррорезонансных колебаний и от дуговых замыканий на землю рекомендуются следующие мероприятия:

- заземление нейтрали сети через ДГР или резистор, обеспечивающий разряд емкостей сети за 0,01 с;

- уменьшение в сети числа трансформаторов напряжения с заземленными нейтралью высоковольтных обмоток. Где есть возможность, следует ограничиться измерением междуфазных напряжений, используя для этого трансформаторы (типа НОМ), соединенные по схеме открытого треугольника;

- в сетях 35 кВ применение вместо трехфазной группы ЗНОМ-35 двух трансформаторов НОМ-35 для измерения междуфазных напряжений и одного ЗНОМ-35, включенного в нейтраль питающего трансформатора, для контроля изоляции сети;

- в сетях 6-10 кВ использование резисторов порядка 10 кОм, постоянно включенных в нейтральный провод трансформаторов напряжения. При этом изоляция нейтрали должна выдерживать перенапряжения примерно $1,3 U_{\Phi}$;

- включение резистора 25 Ом, 400 Вт во вторичную обмотку ТН, соединенную по схеме разомкнутого треугольника. Защитный резистор устанавливается без предохранителя непосредственно у ТН и остается постоянно включенным.

Такой резистор, однако, не всегда эффективен, поэтому в схеме, где замечены феррорезонансные колебания, целесообразность его использования следует проверить экспериментально.

5.6. Защита от перенапряжений установок с вакуумными выключателями

При применении вакуумных выключателей на присоединениях с электродвигателями и трансформаторами следует предусматривать средства защиты от перенапряжений. В качестве таковых должны применяться ОПН и демпфирующие RC -цепочки, как наиболее эффективные средства по сравнению с другими мероприятиями (задержка в отключении двух фаз, управление моментом коммутации и др.).

5.6.1. ОПН должны подключаться между фазой и землей со стороны коммутируемого присоединения или параллельно контактам выключателя. ОПН, установленные на шинах, не защищают присоединение при его отключении вакуумным выключателем. Устанавливаемые между фазой и землей ОПН должны располагаться непосредственно у защищаемого объекта или в начале кабеля, в ячейке КРУ у выключателя, если длина кабеля не больше 50 м.

ОПН, подключаемый непосредственно на зажимах защищаемого объекта (электродвигателя), обеспечивает ограничение перенапряжений до необходимого уровня (см. Приложение 10) и, вместе с тем, оказывается неуязвимым в режиме с перемежающейся дугой. Последнее обусловлено тем, что при перенапряжениях, вызванных перемежающейся дугой, ток через ОПН имеет безопасные значения, поэтому такие ОПН могут применяться в схемах с любым значением емкостного тока замыкания на землю. Этим свойствам отвечают ОПН с параметрами, приведенными во втором столбце табл.5.1.

Если длина кабеля менее 50 м, а емкостной ток замыкания на землю не превышает 10 А, то ОПН может устанавливаться между фазой и землей в ячейки КРУ у выключателя со стороны кабеля, питающего электродвигатель. Его параметры должны быть не хуже указанных в третьем столбце табл.5.1.

При включении ОПН параллельно контактам выключателя обеспечивается более глубокое ограничение перенапряжений, а сам ОПН подвергается менее тяжелым воздействиям. Параметры этих ОПН, независимо от режима заземления нейтрали, величины емкостного тока замыкаемого на землю и длины коммутируемого кабеля, должны быть не хуже приведенных в четвертом столбце табл.5.1.

Таблица 5.1

Основные параметры ОПН для защиты сетей 6 кВ с электродвигателями

Параметры ОПН	ОПН между фазой и землей на зажимах электродвигателя	ОПН между фазой и землей на питающем конце кабеля	ОПН между контактами выключателя
Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ, не менее	6	6	5,5
Напряжение частотой 50 Гц на ограничителе:			
а) допустимое неограниченное время, кВ, не менее	6,6	-	-
б) допустимое в течение 2 часов, кВ, не менее	-	6,6*	6,6**
Напряжение на ограничителе при	18,5	14,8	13,5

импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой 500 А, кВ, не более			
Пропускная способность при двадцати прямоугольных импульсах тока 2000 мкс с амплитудой, А	400	400	150

* - с предварительно поглощенной энергией 17 кДж;

** - без предварительно поглощенной энергии.

5.6.2. Демпфирующая RC -цепочка должна применяться для защиты наиболее ответственных электродвигателей, при этом установка RC -цепочек на нескольких присоединениях не должна приводить к установке в сети дополнительных дугогасящих реакторов. RC -цепочку рекомендуется устанавливать непосредственно у защищаемого объекта. Допускается установка RC -цепочки в начале кабеля в ячейки КРУ у выключателя, если расчетом показано, что обеспечивается требуемый уровень ограничения перенапряжения на защищаемом объекте.

Емкость C защитной RC -цепочки выбирается в 5 раз больше емкости отключаемого присоединения (емкость кабеля по прямой последовательности плюс емкость защищаемого объекта). Сопротивление R защитной RC -цепочки определяется по формуле:

$$R = 1,75\sqrt{L/C}, \text{ Ом,}$$

где $L = L_{\text{ш}} + L_{\text{к}}$, $L_{\text{ш}}$ - индуктивность ошиновки, принимаемая равной $25 \cdot 10^{-6}$ Гн;
 $L_{\text{к}}$ - индуктивность кабеля 6 кВ на высоких частотах (в зависимости от поперечного сечения токоведущей жилы S):

S , мм	2	35	50	70	95	120	150	185	240
$L_{\text{к}}$, мГн/км		0,14	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,055

Эквивалентная емкость двигателя $C_{\text{д}}$, мкФ, при отсутствии конкретных данных может быть определена по формуле

$$C_{\text{д}} = 4 \cdot 10^{-4} \sqrt{P_{\text{н}}}, \text{ мкФ,}$$

где $P_{\text{н}}$ - номинальная мощность двигателя, кВт.

Для RC -цепочек можно применить бумажно-масляные конденсаторы на напряжение 6-10 кВ (например, применяемые для компенсации реактивной мощности); резистор R должен быть рассчитан на длительную мощность 100 Вт (например, типа ТВО).

Защита от перенапряжений, вызванных вакуумными выключателями, не требуется в следующих случаях:

- при установке вакуумного выключателя на присоединении электродвигателя, пусковой ток которого более 1800 А (действующее значение);
- при установке вакуумного выключателя на присоединение с трансформатором, если суммарная емкость на землю превышает 0,2 мкФ;
- если трансформаторы защищены ОПН или вентильными разрядниками по условию грозозащиты;
- в распределительных сетях при применении вакуумных выключателей на головных участках ВЛ 6-35 кВ, имеющих отпаечные трансформаторы;
- для изоляции аппаратов-разъединителей, трансформаторов тока, трансформаторов напряжения и др.

5.7. Защита неиспользуемых обмоток трансформаторов

Неиспользуемой считается обмотка, не имеющая присоединения или длительно отключенная от него (при монтаже, в пусковой период электроустановки, при выводе в ремонт присоединения, при наличии АВР на данном напряжении).

Длительная эксплуатация трансформаторов и автотрансформаторов не допускается, если их неиспользуемые обмотки низшего (среднего) напряжения не соединены в звезду или треугольник и не защищены от перенапряжений. Защита неиспользуемых обмоток низшего напряжения, расположенных между обмотками более высокого напряжения, должна быть осуществлена вентильными разрядниками или ограничителями перенапряжений, присоединенными к выводу каждой фазы. Защита неиспользуемых обмоток низшего и среднего напряжения, расположенных у магнитопровода, осуществляется заземлением одной фазы или нейтрали, либо установкой одного вентильного разрядника или ОПН на одной фазе или нейтрали.

Защита не требуется во всех случаях, если к обмотке низшего напряжения постоянно подключена кабельная линия длиной не менее 30 м, имеющая заземленную оболочку или броню.

ПРИЛОЖЕНИЯ К ЧАСТИ 2

ЗАЩИТА ОТ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-35 кВ

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

ДОПУСТИМЫЕ КРАТНОСТИ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Допустимая (выдерживаемая) кратность внутренних перенапряжений для изоляции электрооборудования сетей 6-35 кВ по отношению к наибольшему рабочему фазному напряжению определяется выражением

$$k_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{доп}}}{U_{\text{нр}} / \sqrt{3}} = \frac{k_{\text{н}} \cdot k_{\text{к}} \cdot U_{\text{исп}}}{U_{\text{нр}} / \sqrt{3}},$$

где $U_{\text{исп}}$ - нормированное одноминутное заводское испытательное напряжение

(действующее значение) главной изоляции электрооборудования; $k_{и}=1,3$ - коэффициент импульса при внутренних перенапряжениях для главной изоляции трансформаторов 6-35 кВ; $k_{к}=0,9$ - коэффициент кумулятивности.

Для электродвигателей коэффициент импульса и кумулятивности принимаются равными единице, а значение испытательного напряжения задается выражением

$$U_{исп} = 2U_{ном} + 1$$

Значения $k_{доп}$ приведены в табл.П10.1.

Таблица П10.1

Допустимая кратность внутренних перенапряжений $k_{доп}$ для электрооборудования 6-35 кВ

$U_{н}$, кВ	6	10	15	20	35
Нормальная изоляция	7,0	5,9	5,2	4,9	4,3
Облегченная изоляция	4,5	4,1	4,3	4,4	-
Изоляция электродвигателей	3,4	3,3	-	-	-

Для аппаратов и внешней изоляции допустимые кратности внутренних перенапряжений на 10-15% выше.

Указанные в табл. П10.1 значения допустимой кратности для электродвигателей приведены для современной терморезистивной изоляции. Вместе с тем, в эксплуатации находится еще большая доля двигателей с микалентной изоляцией. Такая изоляция подвержена сравнительно быстрому старению, а срок наработки электродвигателей с микалентной изоляцией достигает 10 лет и более, поэтому выбор защиты такой изоляции требует особого внимания. В частности, уровень допустимых для микалентной изоляции кратностей перенапряжений, по-видимому, следует выбирать не по заводским испытательным нормам, а по нормам профилактики испытаний в эксплуатации.

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

АНТИРЕЗОНАНСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Мероприятием, исключающим повреждения трансформаторов напряжения в сетях 6-35 кВ, является применение "антирезонансных" трансформаторов напряжения типов НАМИ-6, НАМИ-10 и НАМИ-35.

Антирезонансный трансформатор НАМИ не вступает в резонанс с емкостью ненагруженных шин и линий любой протяженности, а также выдерживает без ограничения длительности как любые виды однофазных замыканий в сети, в том числе через перемежающуюся дугу, так и повышения напряжения, вызванные феррорезонансом емкости сети с другими трансформаторами (силовыми или напряжения).

Трансформаторы НАМИ имеют специальную схему соединения обмоток и пониженную номинальную индукцию (см. рис.П11.1)

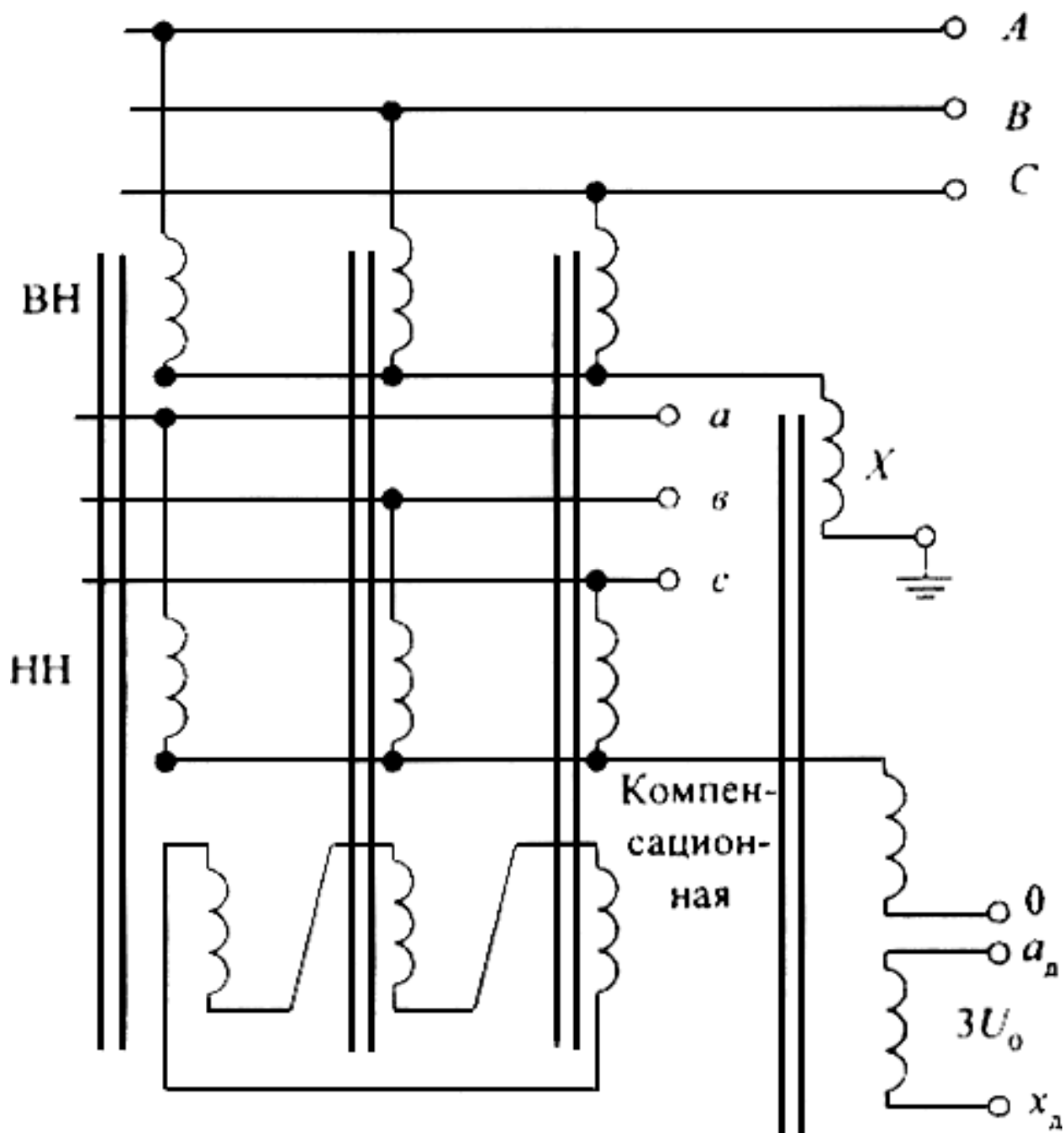


Рис.П11.1. Схема соединения обмоток трансформатора напряжения НАМИ

В баке антирезонансного трансформатора размещаются два трансформатора (трехфазный и однофазный), имеющие отдельные магнитопроводы. В нейтраль высоковольтной обмотки трехфазного трансформатора, имеющего вторичную (компенсационную) обмотку, соединенную треугольником, включен однофазный трансформатор, который измеряет напряжение нулевой последовательности. Предотвращению феррорезонанса способствует то, что в контур нулевой последовательности входит только одна индуктивность намагничивания однофазного трансформатора, и этот феррорезонансный контур лишен источника э.д.с.

Все антирезонансные свойства трансформаторов НАМИ экспериментально проверены в действующих сетях.

Требуется защитить электродвигатель 6 кВ мощностью 400 кВт с помощью RC -цепочки у его зажимов. Длина соединительного кабеля $l_k = 100$ м, сечение 70 мм^2 .

1. Емкость фазы двигателя

$$C_D = 4 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{P_H} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{400} = 0,008 \text{ мкФ.}$$

2. Эквивалентная емкость коммутируемого присоединения

$$C_3 = C_{\text{к.пог}} \cdot l_k + C_D = 0,39 \cdot 0,1 + 0,008 = 0,047 \text{ мкФ,}$$

где $C_{\text{к.пог}} = 0,39 \text{ мкФ/км}$ - погонная емкость кабеля по прямой последовательности.

3. Емкость RC -цепочки

$$C = 5C_3 = 5 \cdot 0,047 = 0,23 \text{ мкФ.}$$

4. Индуктивность схемы

$$L = L_{\text{ш}} + L_{\text{к.пог}} \cdot l_k = 25 \cdot 10^{-6} + 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 = 35 \cdot 10^{-6} \text{ Гн,}$$

где $L_{\text{ш}} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ - индуктивность ошиновки, $L_{\text{к.пог}} = 0,1 \text{ мГн/км}$ - погонная индуктивность кабеля при высоких частотах (см. п.5.6.2).

5. Сопротивление защитной RC -цепочки

$$R = 1,75 \cdot \sqrt{L/C} = 1,75 \cdot \sqrt{35 \cdot 10^{-6} / 0,23 \cdot 10^{-6}} = 22 \text{ Ом.}$$

Таким образом, оптимальные параметры защитной RC -цепочки будут $C = 0,23 \text{ мкФ}$ и $R = 22 \text{ Ом}$.

ЧАСТЬ 3

ГРОЗОЗАЩИТА ЛИНИЙ И ПОДСТАНЦИЙ 6-1150 кВ

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ ЧАСТИ 3

A - крутизна тока молнии на фронте импульса с косоугольным фронтом, кА/мкс;

\bar{A}_1, \bar{A}_2 - математическое ожидание крутизны тока на фронте, соответственно, первого и последующих импульсов многократного разряда молнии, кА/мкс;

$A_{\text{кр}}$ - критическое значение крутизны тока на фронте импульса при ударе молнии в опору и трос, кА/мкс;

$A_{\text{р}}$ - расчетная крутизна фронта волны тока, деформированной после пробега по коронирующему тросу от середины пролета до опоры, кА/мкс;

E_d - градиент разрядного напряжения по дереву, кВ/м;

$E_{кр}$ - критическое значение напряженности электрического поля в земле при пробое грунта, кВ/см;

$E_{пр}$ - пробивная напряженность грунта в однородном поле, кВ/см;

$E_{ср}$ - средняя напряженность на границе коронного чехла при отрицательной полярности, кВ/см;

I - амплитуда импульса тока молнии, кА;

\bar{I} - математическое ожидание амплитуды импульса тока молнии, кА;

$I_{иск}$ - критическое значение импульсного тока через заземлитель, при котором происходит пробой грунта, кА;

$I_{к.з.}$ - ток к.з., кА;

$I_{кр}$ - критическое значение амплитуды тока молнии для линейной изоляции при прорыве молнии на провода, кА;

I_l - ток к.з. при удалении точки удара молнии на расстояние l от шин ПС, кА;

I_o - нормируемый ГОСТ 687-78 ток отключения к.з. выключателем, кА;

$I_{об}$ - амплитуда тока молнии, протекающего через объект с ненулевым сопротивлением заземления, кА;

$I_{R=0}$ - амплитуда тока молнии, протекающего через хорошо заземленный объект, кА;

L - длина ВЛ, км;

$L_{м-м}$ - расстояние между молниеотводами, м;

$L_{оп}^{пр}$ - индуктивность участка опоры от основания до уровня точки подвеса провода, мкГн;

$L_{оп}^{тр}$ - индуктивность опоры от основания до точки подвеса троса (на ВЛ с тросом) или до вершины опоры (для ВЛ без троса), мкГн;

$L_{тр}$ - индуктивность тросов, мкГн;

L_y - длина пути тока утечки изолятора, м;

$M^{пр} (t)$ - взаимная индуктивность между каналом молнии и петлей провод-земля, мкГн;

$M^{тр} (t)$ - взаимная индуктивность между каналом молнии и петлей трос-земля, мкГн;

N - число ударов молнии на 100 км длины ВЛ в год, удары;

N_B - число "боковых" ударов молнии в ВЛ (из пространства слева и справа от оси опоры или вертикальных плоскостей, проходящих через тросы), удары;

N_G - абсолютное число грозových отключений ВЛ в год, шт.;

$N_{Г.д}$ - число грозových дней в году, дни;

$N_{Г.ч}$ - число грозových часов в году, ч;

$N_{доп}$ - допустимое число автоматических отключений ВЛ длиной L по всем причинам, шт.;

$N_{доп.г}$ - допустимое число грозových отключений ВЛ длиной L при фактическом $N_{Г.ч}$, шт.;

N_H - число индуцированных перенапряжений с амплитудой равной и более 25 кВ, шт.;

$N_{н.в}$ - число опасных перенапряжений, возникающих на оборудовании ПС от набегающих грозových волн в год, шт.;

N_o - допустимое без ремонта выключателя количество отключений тока к.з., шт.;

$N_{оп}$ - число ударов молнии в опоры на 100 км, удары;

$N_{п}$ - число "прямых" ударов молнии в ВЛ (в полосу шириной, равной расстоянию между тросами или проводами на бестросовых линиях), удары;

$N_{пр}$ - число прорывов молнии на провод на 100 км, шт.;

$N_{п.у}$ - число случаев перекрытия изоляции на ПС в год при прямых ударах молнии, шт.;

$N_{\text{тр}}$ - число ударов молнии в трос в полете на 100 км, удары;

P_{A_t} - вероятность значений крутизны тока молнии больше A_t , отн.ед.;

P_{I_t} - вероятность значений амплитуды тока молнии больше I_t , отн.ед.;

$P_{I_{\text{кр}}}$ - вероятность значений тока молнии, превышающих критическое для удара молнии в провод, отн.ед.;

$P_{\text{оп}}$ - вероятность обратного перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в опору, отн.ед.;

$P_{\text{тр}}$ - вероятность перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в трос в полете, отн.ед.;

$P_{U_{\text{н}}}$ - вероятность индуктированных перенапряжений, превышающих значение $U_{\text{н}}$,
отн.ед.;

P_{α} , P'_{α} - вероятность прорыва молнии на провода, отн.ед.;

R , R_3 - сопротивление заземления, Ом;

$R_{\text{н}}$ - сопротивление заземления при стекании импульсного тока, Ом;

$R_{\text{к}}$ - радиус расщепления коронирующего провода, м;

$R_{\text{р}}$ - радиус расщепления фазы, м;

$R_{\text{экв}}$ - эквивалентная ширина полосы стягивания "боковых" разрядов (см. $N_{\text{Б}}$) с одной стороны от оси ВЛ, м;

R_{Σ} - сопротивление заземления комбинированного заземлителя, Ом;

R_{\dots} - сопротивление заземления на переменном токе промышленной частоты, Ом;

S - характеристический размер заземлителя, м;

T - число грозовых дней в году (изокераунический уровень), дни;

$T_{н.в}$ - повторяемость опасных перенапряжений на изоляции оборудования ПС от набегающих с ВЛ грозовых волн, годы;

$T_{п.р}$ - средний период планового ремонта выключателей, годы;

$T_{п.у}$ - то же, что $T_{н.в}$, но от прямых ударов в ОРУ, годы;

U - наибольшее длительно допустимое рабочее (линейное) напряжение, кВ;

U_{50} - 50%-ное разрядное напряжение изоляции при стандартном грозовом импульсе по обобщенной для различных типов гирлянд зависимости U_{50} от $l_{разр}$, кВ;

U_{50}^* - 50%-ное разрядное напряжение гирлянды, используемой на ВЛ, при стандартном грозовом импульсе, кВ;

$U_{50}^+(1,2)$ - 50%-ное разрядное напряжение изоляции для стандартного импульса, соответственно, положительной и отрицательной полярности, кВ;

$U_{50}^-(1,2)$

$U_{50}(l_{разр})$ - 50%-ное разрядное напряжение гирлянды для отрицательного импульса с усредненными параметрами ($\tau_{\Phi} = 4 \div 5$ мкс) в зависимости от длины гирлянды.

$U_{50}^+(\tau_{\Phi})$ - 50%-ное разрядное напряжение изоляции для импульса положительной полярности с длительностью фронта более длительности фронта стандартного импульса, кВ;

U_a - амплитудное значение грозового импульса, кВ;

U'_a - крутизна грозового импульса на фронте, кВ/мкс;

$U_{доп}$ - напряжение, допустимое для изоляции оборудования ПС, кВ;

U_n - индуктированное напряжение на ВЛ 6-35 кВ, кВ;

$U_{н1,2}$, $U_{н1,2,3}$ - значение индуктированного напряжения, вызывающего двух и трехфазное перекрытие изоляции на ВЛ 6-35 кВ, кВ;

$U_{из}(t)$ - суммарное (импульсное и рабочее) напряжение на линейной изоляции при ударе молнии в опору и трос, кВ;

$U_{\text{имп}}(t)$ - импульсное напряжение на линейной изоляции, кВ;

$U_{\text{ин.м}}(t)$ - составляющая индуктированного напряжения, создаваемая током в опоре и током в канале молнии, кВ;

$U_{\text{ин.тр}}(t)$ - напряжение, индуктированное на проводе током в тросе, кВ;

$U_{\text{ин.э}}(t)$ - электрическая составляющая индуктированного напряжения, кВ;

$U_{\text{к}}$ - напряжение начала короны на проводе или тросе, кВ;

$\Delta U_{\text{к}}$ - координационный интервал по напряжению, кВ;

$U_{\text{к.п}}$ - напряжение докоронного порога, кВ;

$U_{\text{мин}}$ - минимальное разрядное напряжение линейной изоляции, кВ;

$U_{\text{н}}$ - номинальное напряжение ВЛ, кВ;

$U_{\text{ост}}$ - остающееся напряжение на защитном аппарате, кВ;

$U_{\text{п.в}}$ - амплитуда испытательного напряжения полной волной, кВ;

$U_{\text{пр}}$ - напряжение на проводе в точке удара молнии, кВ;

$U_{\text{р}}$ - фазное рабочее напряжение ВЛ, кВ;

$U_{\text{разр}}(t)$ - вольт-секундная характеристика гирлянды изоляторов для разрядов на косоугольном фронте импульса, кВ;

$U_{\text{р.в}}$ - амплитуда расчетного грозового импульса, кВ;

$U_{\text{R}}(t)$ - составляющая импульсного напряжения на изоляции, вызванная падением напряжения на сопротивлении заземления опоры, кВ;

$U_{\text{T}}(t)$ - напряжение на трансформаторе, кВ;

$U_{\text{экс}}$ - среднее эксплуатационное линейное рабочее напряжение, кВ;

a - крутизна тока молнии, кА/мкс;

- c - скорость света, м/мкс;
- c_0 - геометрическая емкость провода на единицу длины, пФ/м;
- $c_{\text{д}}$ - динамическая емкость провода на единицу длины, пФ/м;
- $c_{\text{ш}}$ - удельная емкость ошиновки, пФ/м;
- d - шаг расщепления, м;
- Δd - расстояние между тросом и проводом по горизонтали, м;
- $d_{\text{тр-тр}}$ - расстояние по горизонтали между тросами или верхними проводами (для бестросовых ВЛ), м;
- $f_{\text{пр}}$ - стрела провеса провода, м;
- $f_{\text{тр}}$ - стрела провеса троса, м;
- h - высота стержневого или протяженного молниеотвода, м;
- Δh - разность высот подвеса троса и провода на опоре, м;
- $h_{\text{эф}}$ - наибольшая высота зоны защиты молниеотвода, м;
- $h_{\text{Г}}$ - наименьшее допустимое расстояние от провода до земли в середине пролета, м;
- $h_{\text{с.г}}$ - наименьшая высота границы внутренней зоны защиты совместно действующих молниеотводов, м;
- $h_{\text{оп}}$ - высота опоры, м;
- $h_{\text{пр}}$ - высота подвеса провода на опоре, м;
- $h_{\text{ср}}$ - средняя высота подвеса троса (провода), м;
- $h_{\text{ср.пр}}$ - средняя высота подвеса провода, м;
- $h_{\text{ср.тр}}$ - средняя высота подвеса троса, м;

$h_{\text{тр}}$ - высота подвеса троса на опоре, м;

$h_{\text{тр-пр}}$ - расстояние по вертикали между тросом и проводом в середине пролета, м;

$i_{\text{м}}$ - ток молнии, кА;

$i_{\text{оп}}$ - ток, протекающий по опоре, кА;

$i_{\text{тр}}$ - ток, ответвляющийся в тросы, кА;

j - плотность тока, кА/м^2 ;

$k_{\text{АПВ}}$ - коэффициент успешности автоматического повторного включения (АПВ), отн.ед.;

$k_{\text{в}}$ - коэффициент, учитывающий условия эксплуатации линейного выключателя, отн.ед.;

$k_{\text{г}}$ - геометрический коэффициент связи провода и троса (нескольких тросов), находящихся под напряжением, отн.ед.;

$k_{\text{Е}}$ - коэффициент, учитывающий снижение градиента разрядного напряжения с увеличением длины гирлянды, отн.ед.;

k_{f} - коэффициент формы для расчета сопротивления заземления, отн.ед.;

k_{h} - отношение эквивалентной полосы стягивания "боковых" разрядов к средней высоте подвеса троса (провода на бестросовых ВЛ) - $R_{\text{ЭКВ}} / h_{\text{ср}}$, отн.ед.;

$k_{\text{к}}$ - коэффициент связи провода с коронирующим тросом (тросами), отн.ед.;

$k_{\text{кон}}$ - коэффициент, учитывающий различие в конструкции изоляторов (отношение длины пути тока утечки $L_{\text{у}}$ к строительной высоте изолятора $H_{\text{из}}$), отн.ед.;

$k_{\text{под}}$ - коэффициент подобия при расчете сопротивления заземления лучевого заземлителя, отн.ед.;

$k_{\text{з}}$ - коэффициент экранирования трассы ВЛ от разрядов молнии, отн.ед.;

l - расстояние между точкой к.з. на ВЛ и шинами ПС, км;

$l_{\text{арм}}$ - длина строительной арматуры, м;

$l_{\text{г}}$ - длина гирлянды для подвески провода (со строительной арматурой), м;

$l_{\text{г.тр}}$ - длина гирлянды для подвески троса (со строительной арматурой), м;

$l_{\text{габ}}$ - габаритный пролет, м;

$l_{\text{д}}$ - длина изоляции по дереву, м;

$l_{\text{о.з}}$ - длина опасной зоны на подходе к ПС, км;

$l_{\text{прол}}$ - длина пролета, м;

$l_{\text{р-а}}$ - расстояние между разрядником и автотрансформатором, м;

$l_{\text{р-р}}$ - расстояние между разрядником и реактором, м;

$l_{\text{разр}}$ - длина разрядного пути по гирлянде изоляторов, м;

n - число составляющих проводов расщепленной фазы, шт.;

$n_{\text{б.у}}$ - удельное число грозовых отключений ВЛ 6-35 кВ на 100 км и 100 грозовых часов от близких ударов молнии в землю, шт.;

$n_{\text{вл}}$ - число отходящих от подстанций ВЛ, шт.;

$n_{\text{г}}$ - удельное число грозовых отключений ВЛ, рассчитанное на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;

$n_{\text{г}}'$ - удельное число грозовых отключений на 100 км и один год эксплуатации, шт.;

$n_{\text{г.1ц}}$ - удельное число грозовых отключений одной цепи ВЛ на двухцепных опорах на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;

$n_{\text{г.2ц}}$ - удельное число грозовых отключений одновременно двух цепей ВЛ на общей опоре на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;

$n_{\text{г.пред}}$ - предельное значение удельного числа грозовых отключений ВЛ по критерию коммутационного ресурса выключателя на 100 км и 100

грозовых часов, шт.;

$n'_{г.пред}$ - предельное значение удельного числа грозовых отключений одной цепи на двухцепных опорах по критерию коммутационного ресурса выключателя на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;

$n_{из}$ - число изоляторов в гирлянде, шт.;

$n_{п.у}$ - удельное число грозовых отключений ВЛ 6-35 кВ на 100 км и 100 грозовых часов от прямых ударов молнии в линию, шт.;

$n_{общ}$ - общее число автоматических отключений ВЛ по всем причинам, рассчитанное на 100 км и один год эксплуатации, шт.;

$n_{оп}$ - удельное число грозовых отключений от обратных перекрытий от ударов в опору, рассчитанное на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;

$(n_{оп} + n_{тр})_{пред}$ - предельное значение удельного числа грозовых отключений от обратных перекрытий по критерию коммутационного ресурса выключателя на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;

$(n_{оп} + n_{тр})^{\diamond}_{пред}$ - то же самое, что и $(n_{оп} + n_{тр})_{пред}$, но для двух цепей на двухцепных опорах и только от первых перекрытий, т.е. без учета перекрытий после перекрытия изоляции соседней цепи, шт.;

$n_{пр}, n'_{пр}$ - удельное число грозовых отключений от прорывов молнии на провода, рассчитанное на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;

n_s - удельное число грозовых отключений от перекрытий воздушного промежутка трос-провод от ударов молнии в среднюю часть пролета, рассчитанное на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;

$n_{тр}$ - удельное число грозовых отключений от обратных перекрытий от ударов в середину пролета, рассчитанное на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;

$n_{экс}$ - удельное число грозовых отключений ВЛ по опыту эксплуатации на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;

P_0 - плотность разрядов молнии на 1 км^2 поверхности земли за год;

r_0 - граница зоны защиты стержневого молниеотвода на уровне земли, м;

r_k - радиус чехла короны провода или составляющего провода расщепленной фазы, м;

$r_{пр}$ - радиус провода или составляющей расщепленной фазы, м;

$r_{с.о}$ - граница внутренней зоны защиты совместно действующих молниеотводов на уровне земли, м;

$r_э$ - эквивалентный радиус фазы, м;

$r_{тр}$ - радиус троса, м;

$r_{э.к}$ - эквивалентный радиус расщепленной коронирующей фазы, м;

t - время, мкс;

$t_{кр}$ - момент перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в опору, мкс;

t_{max} , t_{min} - максимальная и минимальная длительность фронта расчетного импульса тока молний, мкс;

$t_{л_{трол/2}}$ - время пробега волной половины пролета, мкс;

u - импульсное напряжение на проводе (тросе), кВ;

$u_p(\varphi)$ - рабочее напряжение в момент разряда молнии в ВЛ, кВ;

$u_{тр}$ - напряжение на тросе, кВ;

v - скорость распространения главного разряда молнии, м/мкс;

Z - волновое сопротивление, Ом;

$Z_{Г}$ - геометрическое (без учета короны) волновое сопротивление троса или провода, Ом;

$Z_{Г.пр}$ - геометрическое волновое сопротивление провода, Ом;

$Z_{к.пр}$ - волновое сопротивление коронирующего провода, Ом;

$Z_{к.тр}$ - волновое сопротивление тросов с учетом короны, Ом;

$Z_{м}$ - сопротивление канала молнии, Ом;

$Z_{тр}$ - волновое сопротивление тросов, Ом;

$Z_{\text{ЭКВ}}$ - волновое сопротивление нескольких параллельных тросов или проводов, Ом;

α - угол защиты троса, град;

β - относительная скорость обратного разряда молнии, отн.ед.;

β_{Γ} - доля грозовых в общем числе автоматических отключений ВЛ, отн.ед.;

$\delta_{\text{оп}}$ - доля ударов в опоры и прилегающие участки троса от общего числа ударов молнии в пролет ВЛ, отн.ед.;

ε - относительная диэлектрическая проницаемость грунта, отн.ед.;

ε_0 - диэлектрическая постоянная, равна 8,85 пФ/м;

η - коэффициент перехода импульсного перекрытия в дугу тока промышленной частоты, отн.ед.;

ρ - удельное сопротивление грунта, Ом·м;

$\sigma_{\lg A_1}, \sigma_{\lg A_2}$ - коэффициент изменчивости крутизны тока на фронте, соответственно, первого и последующих импульсов многократного разряда молнии для логарифмически нормального распределения, где A_1 и A_2 в кА/мкс;

$\sigma_{\lg I}$ - коэффициент изменчивости амплитуды тока молнии для логарифмически нормального распределения, где I в кА;

$\tau_{\text{н}}$ - длительность спада импульса тока до значения $0,5 I$, мкс;

$\tau_{\text{ф}}$ - длительность фронта импульса, мкс;

$\Psi_{\text{пр}}, \Psi_{\text{оп}}$ - доли опасных для изоляции ПС импульсов, соответственно, при прорыве молнии на провода и при обратных перекрытиях изоляции ВЛ, отн.ед.;

Π_1, Π_2 - координаты критериальной зависимости для расчета импульсного сопротивления заземления, отн.ед.;

Π_1^0, Π_2^0 - координаты критериальной зависимости для расчета импульсного сопротивления заземления, но соответствующие стационарному сопротивлению заземления, отн.ед.

РАЗДЕЛ 6. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА МОЛНИИ В РАСЧЕТАХ ГРОЗОЗАЩИТЫ

6.1. Краткие сведения о механизме разряда молнии

Грозовое облако является носителем электрических зарядов, сосредоточенных на водяных каплях. Их движение и распределение в облаке зависят не только от сил электростатического взаимодействия, но также от силы тяжести капель, скорости и направления воздушных потоков. Вследствие совместного действия этих сил в облаке могут длительно существовать зоны положительной и отрицательной полярности с различной плотностью зарядов. Неравномерность распределения зарядов приводит к возникновению сильного электрического поля внутри облака между зонами различной полярности и между облаком и землей. Условия для возникновения молнии создаются, когда в каком-либо месте облака напряженность электрического поля превысит электрическую прочность воздуха.

Разряд молнии прорастает в виде лидера, направленного в основном по силовым линиям электрического поля. Как показывают результаты инструментальных исследований, разряды молнии в землю с вероятностью 0,9 возникают из отрицательной по отношению к земле зоны облака (такие разряды принято называть отрицательными). Образование и дальнейшее развитие лидера молнии представляет собой сложный физический процесс, многие детали которого до сих пор недостаточно исследованы, поэтому для инженерных расчетов неизбежно использование упрощенной модели разряда молнии, в которой лидер отрицательного разряда рассматривается как канал, заполненный отрицательными зарядами.

Время прорастания лидера от облака до поверхности земли составляет несколько миллисекунд. Как показывают фотографические наблюдения (фоторазвертки), лидер прорастает не равномерно, а скачками или ступенями. Средняя скорость прорастания лидера оценивается значениями, близкими к 0,0005 скорости света, а во время скачка к земле направление прорастания лидера определяется картиной электрического поля вблизи его головки, в частности, скоплениями объемных зарядов, создаваемых заряженными водяными каплями в пространстве между облаком и землей, потому лидер молнии обычно прорастает по искривленному пути, имеющему многочисленные изломы и разветвления. По мере того, как отрицательно заряженный канал лидера приближается к поверхности земли, напряженность электрического поля между ним и землей растет. На земле и наземных объектах накапливаются заряды противоположной (положительной) полярности, индуктированные зарядом лидера, и напряженность электрического поля на отдельных точках поверхности земли, в особенности на возвышающихся объектах, достигает критического значения, при этом на наземных объектах (на опорах, тросах и проводах ВЛ) возникают положительные стримеры, а затем развивается и встречный лидер.

В заключительной фазе разряда молнии происходит перекрытие промежутка между нисходящим и встречным лидерами. Таким образом, при определенной высоте лидера над землей проявляется ориентация разряда молнии на тот или иной наземный объект. Предполагается, что ориентировка лидера происходит, когда средняя напряженность в промежутке между головкой лидера и наземными объектами достигнет 500 кВ/м.

Перекрытие воздушного промежутка между головкой лидера и наземным объектом является переходом от первой (лидерной) стадии к главной стадии разряда молнии, в которой происходит компенсация отрицательного заряда лидера положительными зарядами, притекающими из земли, при этом через пораженный молнией объект протекает ток, который и представляет собой "ток молнии". Процесс нейтрализации отрицательного заряда распространяется вверх по лидеру, образуя ярко светящийся канал главного разряда, прорастающий от земли к облаку со скоростью порядка десятых долей скорости света. Амплитуда тока молнии, протекающего через пораженный объект, так же как и высота ориентировки, зависит от заряда лидера. Это дает возможность установить связь между током молнии и высотой ориентировки, которая изменяется от 200 и более метров - для ударов с токами свыше 200 кА, и до 20-30 м - для ударов с токами 15-20 кА.

При отрицательном ударе молнии вслед за главным разрядом обычно наблюдаются

повторные разряды по тому же каналу. Повторные разряды вызываются тем, что нейтрализация зарядов канала приводит к разрядам соседних заряженных областей облака на канал и через него в землю. Типичная осциллограмма многократного разряда изображена на рис.6.1. В отдельных случаях наблюдалось до тридцати и более повторных разрядов в одном ударе молнии, однако 50% ударов содержит не более двух-трех импульсов. На рис.6.2

показано распределение числа составляющих $N_{\text{и}}$ в многократном разряде. Общая продолжительность многократного разряда может достигать 1 с, как на рис.6.1, но такие затяжные удары являются редким явлением. Большая часть ударов имеет длительность не более 0,3 с.

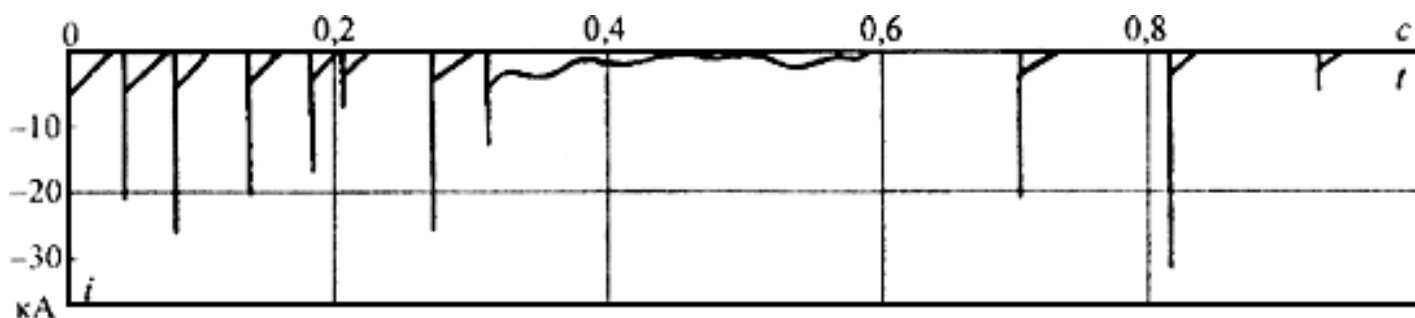


Рис.6.1. Типичная осциллограмма тока многократного разряда молнии отрицательной полярности (медленная развертка)

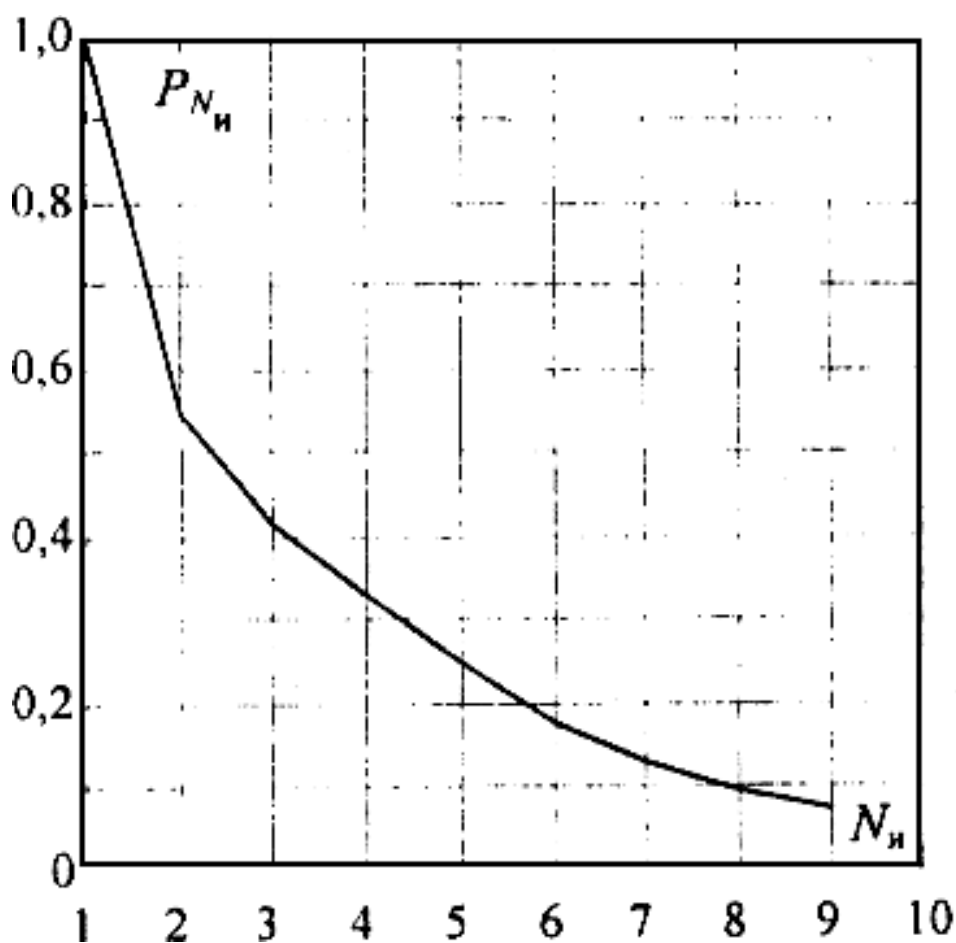


Рис.6.2. Распределение числа импульсов в многократном разряде молнии (6000 регистраций)

Характерные осциллограммы импульсов тока первой (1) и последующих (2) составляющих многократного разряда показаны на рис.6.3 в двух масштабах времени. Форма импульса первой составляющей имеет следующие особенности: ток в начальной стадии нарастает относительно медленно; фронт импульса имеет вогнутую форму; наибольшая крутизна фронта наблюдается вблизи максимума тока. Изломы и колебания кривой тока вблизи максимума объясняются искривлениями канала молнии и наличием в нем ответвлений. После нейтрализации канала лидера в стадии главного разряда ток молнии через пораженный объект в течение 100-200 мкс падает до небольшого или до нулевого значения (см. рис.6.3, б, кривая 1).

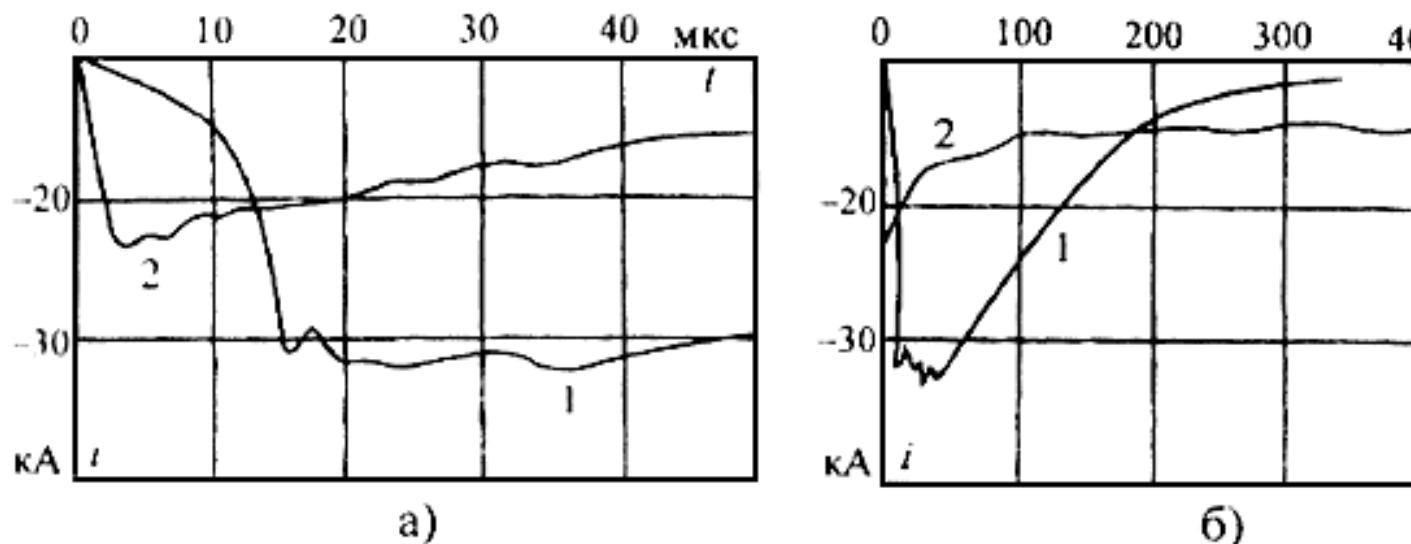


Рис.6.3. Типичные осциллограммы импульса тока первой (1) и последующих (2) составляющих многократного разряда молнии отрицательной полярности в разных масштабах времени (а, б)

Импульс тока молнии, протекающего через пораженный объект при повторных разрядах, отличается более коротким фронтом и длительностью и, как правило, меньшей амплитудой при большей крутизне тока на фронте. По форме он ближе к стандартному грозовому импульсу с параметрами 1,2/50 мкс.

Положительные удары молнии, составляющие в среднем 10%, бывают, как правило, однократные. Они могут иметь значительную амплитуду тока, однако обычно для них характерен пологий фронт. В редких случаях (около 4%) наблюдаются колебательные разряды. В настоящее время эти два типа разрядов молнии не учитываются в расчетах грозозащиты ВЛ и ПС.

6.2. Количественные характеристики разряда молнии

6.2.1. Параметры разряда молнии, используемые в расчетах грозозащиты ВЛ и ПС, и информация об их количественных характеристиках дана в табл.6.1.

Таблица 6.1

Параметры разряда молнии, используемые в расчетах грозозащиты ВЛ и ПС

Параметр	Количественные характеристики
Полярность разряда	С вероятностью 0,9 отрицательная
Многокомпонентность	Статистическое распределение числа

		импульсов в разрядах по рис.6.2
Для первой и последующих составляющих	Форма импульсов	Обобщенная форма импульсов дана на рис.6.4, расчетная (п.6.2.3)
	Длительность импульса и длительность фронта	Статистические распределения (п.6.2.2)
	Амплитуда и крутизна тока	
	Корреляция между амплитудой и крутизной тока	В расчетах грозозащиты амплитуда и крутизна тока приняты взаимонезависимыми (п.6.2.4)
Скорость распространения главного разряда		Принята 0,3 скорости света (п.6.2.5)
Эквивалентное сопротивление канала молнии		Учитывается зависимость от амплитуды тока молнии (п.6.2.6)

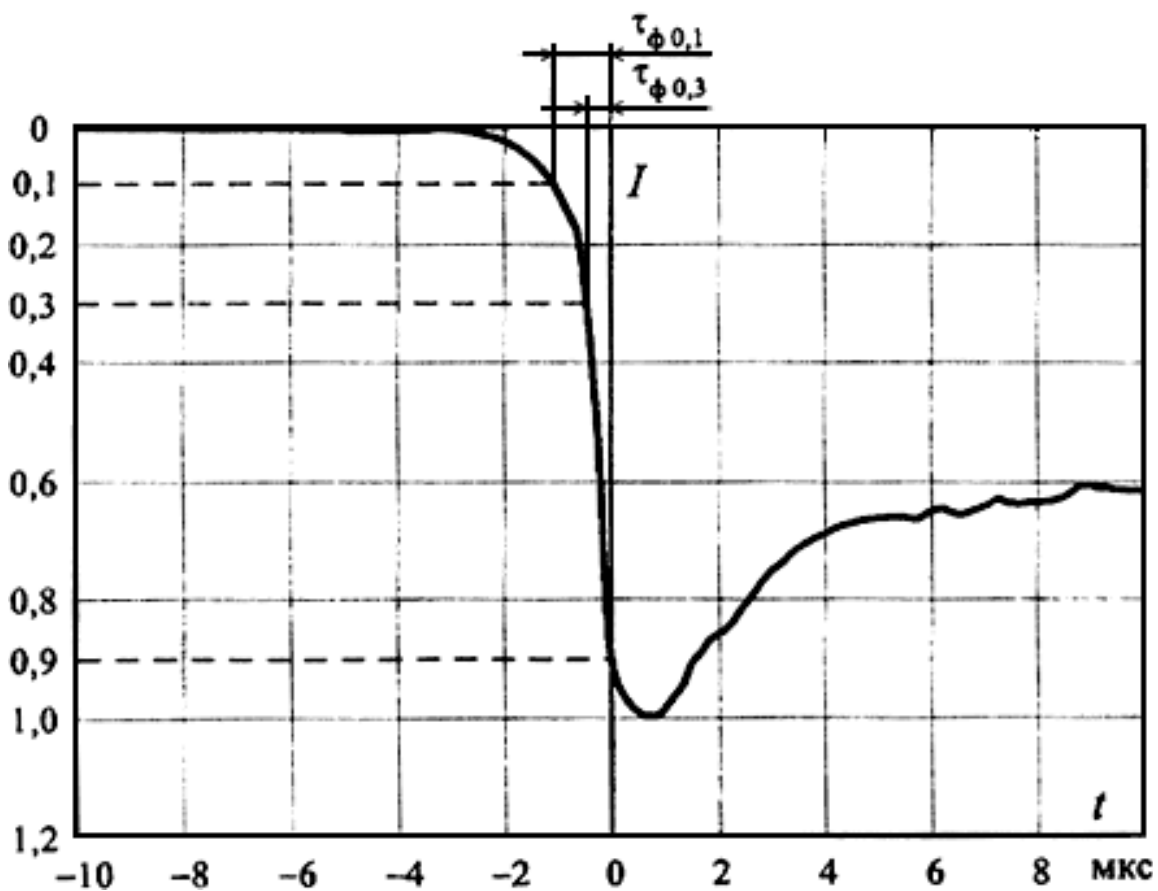
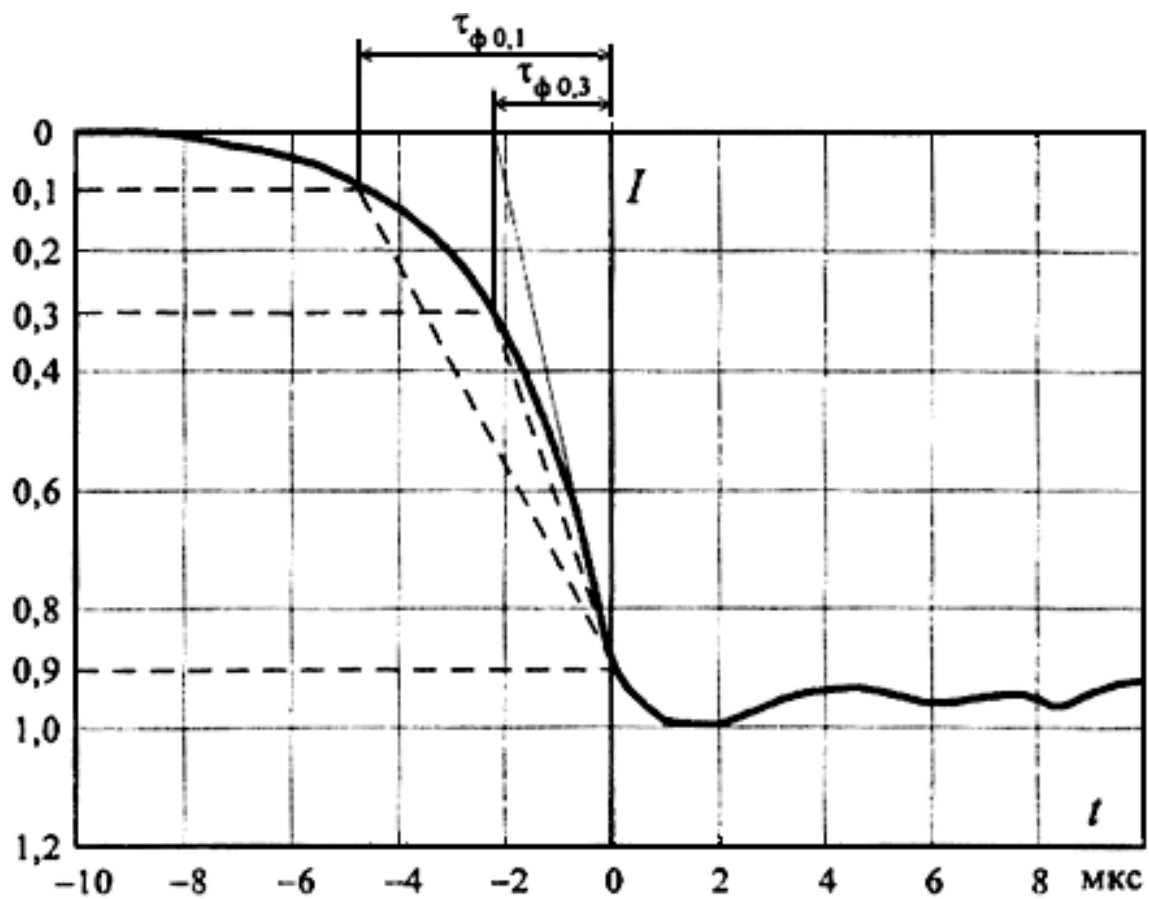


Рис.6.4. Среднестатистическая форма импульсов многократного разряда молнии:
а) первый импульс; б) последующие импульсы

Грозоупорность ВЛ, как правило, рассчитывается только для первого импульса разряда молнии, так как вероятность перекрытия изоляции при воздействии последующих импульсов на порядок и более меньше, чем при воздействии первого импульса. Учет последующих импульсов в оценке грозоупорности оправдан только в некоторых специальных случаях при большой индуктивности опор (многоцепные ВЛ на одностоечных опорах, большие переходы ВЛ через водные преграды и т.д.).

При многократном разряде молнии перенапряжения на изоляции ВЛ возникают как на первом, так и при последующих импульсах тока, однако при обычном времени действия защит и АПВ (не менее 1 с) все возможные при многократном разряде молнии перекрытия линейной изоляции укладываются в интервал одного отключения ВЛ.

Грозозащита ПС должна рассчитываться с обязательным учетом первых и последующих импульсов многократного разряда молнии.

6.2.2. В результате обработки осциллограмм, многократного разряда молнии получены статистические распределения, описанные логарифмически нормальным законом, для следующих параметров первого и последующих импульсов:

- амплитуда тока I ;
- крутизна тока на фронте:

на участке (0,1-0,9) I	- $A_{0,1}$;
на участке (0,3-0,9) I	- $A_{0,3}$;
максимальная	- A_{max} ;
- длительность спада импульса тока до значения $0,5 I$ - τ_k ;
- длительность фронта:

на участке (0,1-0,9) I	- $\tau_{\Phi 0,1}$;
на участке (0,3-0,9) I	- $\tau_{\Phi 0,3}$.

Характеристики логарифмически нормальных распределений параметров разряда молнии (математическое ожидание \bar{I} и коэффициент изменчивости $\sigma_{lg I}$), значения параметров, превышение которых возможно с вероятностью 0,95; 0,5 и 0,05, а также наибольшие зарегистрированные их значения приведены в табл.6.2.

Таблица 6.2

Характеристики логарифмически нормальных распределений параметров многократного разряда молнии

Наименование параметра	Характеристики распределения	Значение параметра, превышение которого	Наибольшее зарегистри-

			возможно с вероятностью					рованное значение
			\bar{I}	$\sigma_{lg I}$	0,95	0,5	0,05	
Первый импульс	Амплитуда тока молнии, кА (по данным обработки измерений на объектах разных типов)	СИГРЭ (башни)	30,3	0,32	8,9	30,0	100,8	250
		ВНИИЭ (ВЛ, $h_{оп}$ =25-45 м)	28,0	0,32	8,3	28,0	94,0	250
		НИИПТ (ВЛ, $h_{оп}$ =13-20 м)	20,0	0,39	4,6	20,0	87,7	250
	Длительность импульса τ_n , мкс		75,0	0,25	30,0	75,0	200,0	250
	Крутизна тока, кА/мкс	$A_{0,1}$	5,0	0,28	1,7	5,0	14,1	15,0
		$A_{0,3}$	7,2	0,27	2,6	7,2	20,0	18,0
		A_{max}	24,3	0,26	9,1	24,3	65,0	72,0
	Длительность фронта, мкс	$\tau_{\Phi 0,1}$	4,5	0,25	1,8	4,5	11,3	30,0
		$\tau_{\Phi 0,3}$	2,3	0,24	0,9	2,3	5,8	9,0
	Последующие импульсы	Амплитуда тока молнии I , кА	11,8	0,23	4,9	11,8	28,6	35,0

Длительность импульса $\tau_{и}$, мкс		32,0	0,40	6,5	32,0	140,0	170
Крутизна тока, кА/мкс	$A_{0,1}$	15,4	0,41	3,3	15,4	72,0	300
	$A_{0,3}$	20,1	0,42	4,1	20,1	98,5	300
	A_{max}	39,9	0,37	9,9	39,9	161,5	300
Длительность фронта, мкс	$\tau_{\Phi 0,1}$	0,6	0,40	0,1	0,6	2,8	5,2
	$\tau_{\Phi 0,3}$	0,4	0,44	0,1	0,4	1,8	3,8

Для амплитуды тока первых импульсов приведены три варианта распределений (рис.6.5), полученные по результатам полевых исследований в разных странах:

- рекомендация Исследовательского комитета N 33 СИГРЭ - обобщенное распределение по результатам измерений преимущественно на башнях;

- два распределения, обобщающие измерения токов на воздушных линиях, разница высот которых составляет примерно 20 м.

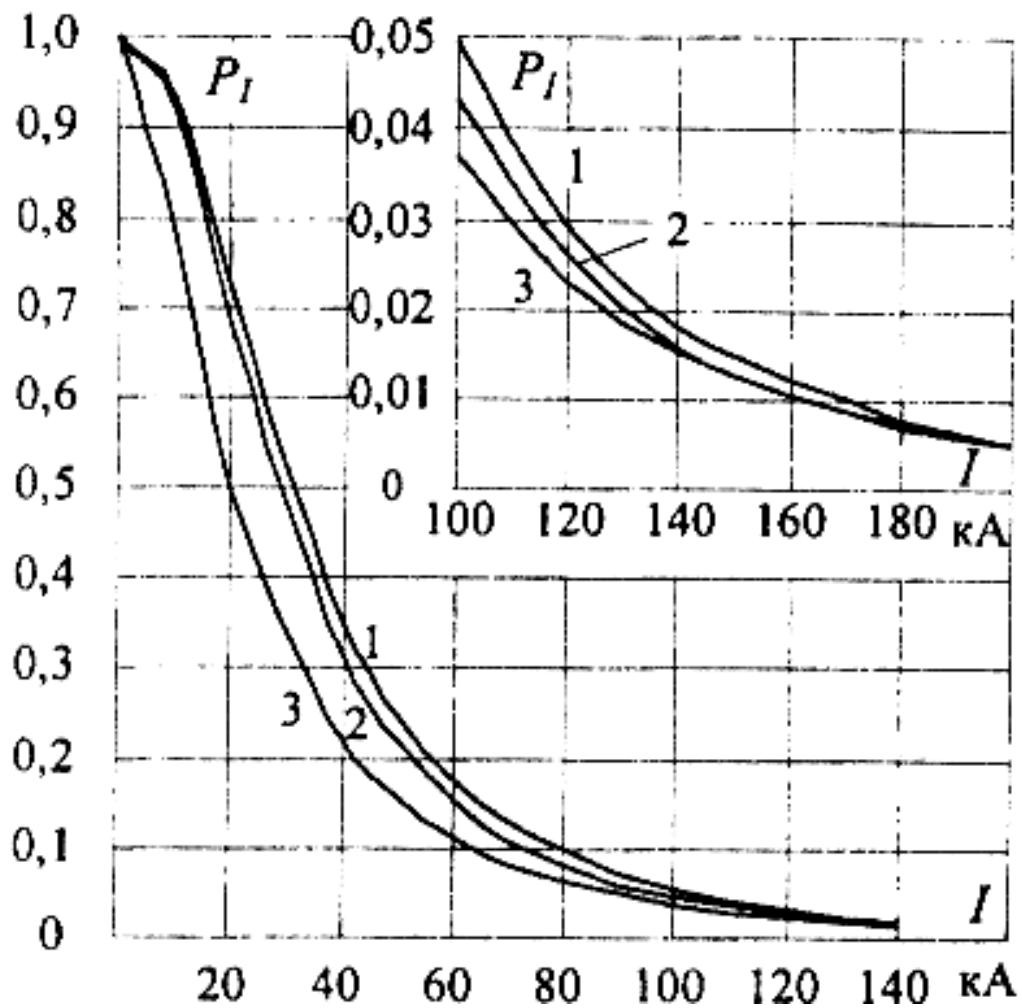


Рис.6.5. Распределение амплитуды тока первых импульсов многократного разряда молнии:

1 - обобщенное распределение по результатам измерений преимущественно на башнях (рекомендация Исследовательского комитета N 33 СИГРЭ);

2 - по измерениям на ВЛ ($h_{\text{оп}}$ до 45 м); 3 - по измерениям на ВЛ ($h_{\text{оп}}$ до 20 м)

Для расчета грозоупорности ВЛ предпочтительнее использовать распределения токов молнии, полученные по регистрациям на ВЛ. Параметры логарифмически нормального закона в зависимости от высоты опор $h_{\text{оп}}$ выбираются следующим образом:

$$\text{при } h_{\text{оп}} \leq 20 \text{ м}$$

$$\bar{I} = 20 \text{ кА, (6.1)}$$

$$\sigma_{\lg I} = 0,39, \text{ (6.2)}$$

$$\text{при } h_{\text{оп}} > 20 \text{ м}$$

$$\bar{I} = 20 + 0,32(h_{\text{оп}} - 20) \text{ кА, (6.3)}$$

$$\sigma_{\lg I} = 0,39 - 0,0028(k_{\text{оп}} - 20) \quad (6.4)$$

Вероятность амплитуды тока молнии, превышающей I_i , рассчитывается с использованием полученных параметров по формуле:

$$P_{I_i} = 1 - \frac{\lg e}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\lg I}} \int_{I_{\min}}^{I_i} \frac{1}{I} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg I - \lg \bar{I}}{\sigma_{\lg I}} \right)^2 \right] dI \quad (6.5)$$

где \bar{I} - значение амплитуды тока молнии, вероятность превышения которой равна 0,5.

6.2.3. Форма фронта импульса тока имеет принципиальное значение в расчетах грозоупорности ВЛ 110 кВ и выше при ударе молнии в опору: в этом случае обратное перекрытие изоляции наиболее вероятно на фронте волны. Фронт импульса, имеющий достаточно сложную форму и непостоянную крутизну, в расчетах заменяется косоугольным с постоянной крутизной с учетом следующих обстоятельств. Обратное перекрытие изоляции при ударе молнии в опору происходит на фронте импульса при достижении значений тока молнии около 30 кА и выше. Для подавляющего большинства импульсов при среднем значении амплитуды тока молнии (20-30) кА этот момент наступает на участке фронта выше $0,5 \bar{I}$, т.е. форма начального участка фронта не имеет существенного значения для расчета грозоупорности ВЛ 110-1150 кВ. Расчетный импульс должен быть близок к реальному на участке выше $0,5 \bar{I}$. Этому условию удовлетворяет импульс с косоугольным фронтом, проходящим через значение $0,9 \bar{I}$ и абсциссу, соответствующую значению $0,3 \bar{I}$ (см. рис.6.4). Параметры логарифмически нормального распределения крутизны тока молнии принятого расчетного импульса оцениваются следующими значениями:

для первого импульса $\bar{A}_1 = 10,8 \text{ кА/мкс}; \sigma_{\lg A_1} = 0,265; \quad (6.6)$

для последующих импульсов $\bar{A}_2 = 30,2 \text{ кА/мкс}; \sigma_{\lg A_2} = 0,4. \quad (6.7)$

Для этого вида воздействия на основании обработки разрядных характеристик изоляции на нестандартных волнах получены необходимые для расчета и соответствующие типу импульсного воздействия вольт-секундные характеристики изоляции для случаев перекрытия на фронте импульса с τ_{Φ} до 10 мкс.

6.2.4. Связь между амплитудой и крутизной тока молнии характеризуется значениями коэффициентов корреляции, приведенными в табл.6.3.

Таблица 6.3

Коэффициенты корреляции между амплитудой I и различными значениями крутизны A на фронте волны тока молнии

Коррелируемые параметры	Крутизна тока на фронте
-------------------------	-------------------------

	$A_{0,1}$	$A_{0,3}$	A_{\max}
Амплитуда тока I : первого импульса	0,30	0,19	0,43
последующих импульсов	0,31	0,23	0,56

На рис.6.6 представлено корреляционное поле амплитуды и максимальной крутизны A_{\max} для первой составляющей разряда. Для амплитуды и крутизны $A_{0,3}$ (при меньшем коэффициенте корреляции) корреляционное поле характеризуется еще большим разбросом точек, поэтому в расчетах грозозащиты амплитуда и крутизна тока молнии для первых и последующих импульсов приняты взаимно независимыми.

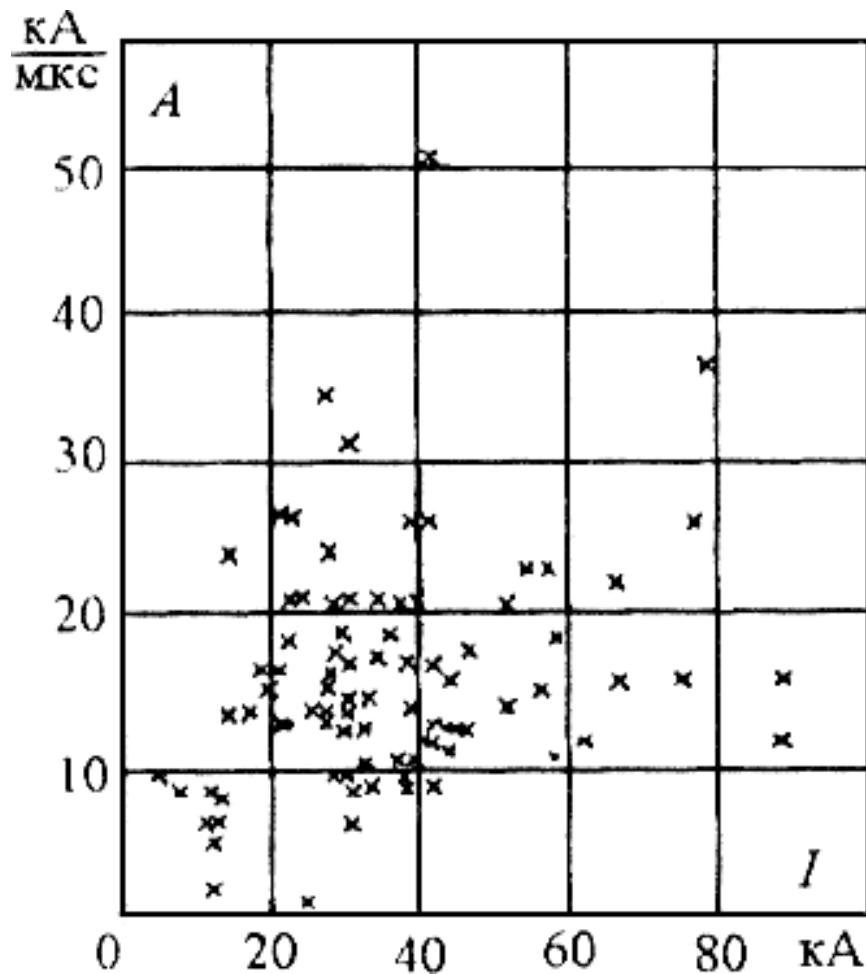


Рис.6.6. Корреляционное поле амплитуды и максимальной крутизны фронта тока для первой составляющей разряда молнии

6.2.5. Скорость распространения главного разряда молнии V зависит от амплитуды тока и изменяется во времени по мере развития канала. Значение V лежит в пределах $(0,1-0,5)C$, где C - скорость света. При одинаковой амплитуде тока молнии скорость распространения главного разряда последующих импульсов больше, чем первого импульса. С учетом того, что амплитуда последующих импульсов обычно меньше, для всех импульсов многократного разряда принимается одинаковое расчетное значение $V = 0,3C$.

6.2.6. Сопротивление канала молнии на стадии главного разряда не остается постоянным, уменьшаясь по мере возрастания протекающего тока. Этот параметр характеризуется некоторым эквивалентным значением $z_{\text{м}}$ и зависит от амплитуды тока молнии (рис 6.7).

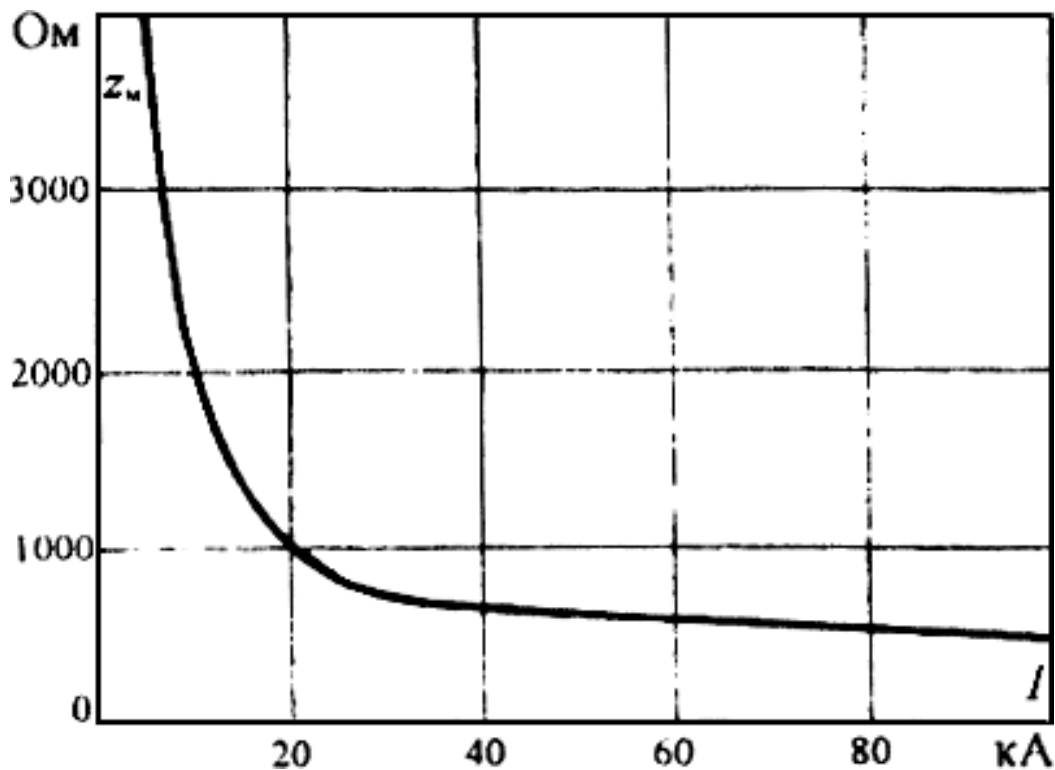


Рис.6.7. Зависимость эквивалентного сопротивления канала от тока молнии

Расчетное значение сопротивления канала молнии влияет на амплитуду тока, протекающего через пораженный объект $I_{\text{об}}$. Расчет $I_{\text{об}}$ выполняют по следующей формуле:

$$I_{\text{об}} = I_{R=0} \cdot \frac{z_{\text{м}}}{z_{\text{м}} + z_{\text{ЭКВ}}}, \quad (6.8)$$

где $I_{R=0}$ - амплитуда тока молнии, протекающего через хорошо заземленный объект;
 $z_{\text{ЭКВ}}$ - эквивалентное сопротивление пораженного объекта. Например, при ударе молнии в провод $z_{\text{ЭКВ}} = z_{\text{пр}} / 2$.

В большинстве расчетных случаев $z_{\text{м}}$ принимается равным бесконечности, при этом $I_{\text{об}} = I_{R=0}$, что соответствует представлению о канале молнии как источнике заданного тока. Расчет показателей грозоупорности ВЛ при $z_{\text{м}} = \infty$ дает небольшой запас при расчете числа грозовых отключений от прорывов молнии на провода. Уточнение значения $z_{\text{м}}$ в соответствии с рис.6.7 следует делать для расчета критического значения тока при ударе молнии в провода ВЛ напряжением 500 кВ и выше, для которых прорывы молнии являются основной причиной грозовых отключений.

6.3. Интенсивность грозовой деятельности

6.3.1. Наиболее информативной для расчета грозопоражаемости энергетических объектов характеристикой является плотность разрядов молнии на землю P_0 , наблюдаемая с помощью счетчиков разрядов молнии в течение длительного срока. Накопленный статистический материал по инструментальным измерениям числа разрядов в большинстве случаев пока еще недостаточен для построения региональных карт плотности наземных разрядов, поэтому P_0 приходится оценивать косвенно через другие многолетние характеристики грозовой деятельности: число грозовых дней и продолжительность грозовой деятельности в часах за год.

6.3.2. Число грозовых дней $N_{г.д}$ (в зарубежной литературе - изокераунический уровень T) - наиболее распространенный и длительно наблюдаемый во многих странах показатель грозовой активности. Имеющиеся ограниченные данные свидетельствуют о слабой корреляционной зависимости числа дней с грозой и плотности разрядов молнии на землю.

При отсутствии других данных для равнинных территорий бывшего СССР P_0 может быть оценено через $N_{г.д}$ по формуле

$$P_0 = 0,036 N_{г.д}^{1,3}, \quad (6.9)$$

где P_0 - плотность разрядов молний на 1 км² поверхности земли за год.

6.3.3. Продолжительность грозовой деятельности в часах наблюдается в ряде стран (30 лет и дольше), в том числе и на территории бывшего СССР. Отмечена корреляция P_0 и $N_{г.ч}$, описываемая для равнинных районов зависимостью

$$P_0 = 0,05 N_{г.ч}. \quad (6.10)$$

На рис.6.8 представлена карта $N_{г.ч}$, разработанная по данным наблюдений за грозой на 1700 гидрометеостанциях (ГМС) на территории бывшего СССР. Эта карта, построенная в масштабе 1:10000000, дает общее представление о распределении грозовой активности на большой территории.

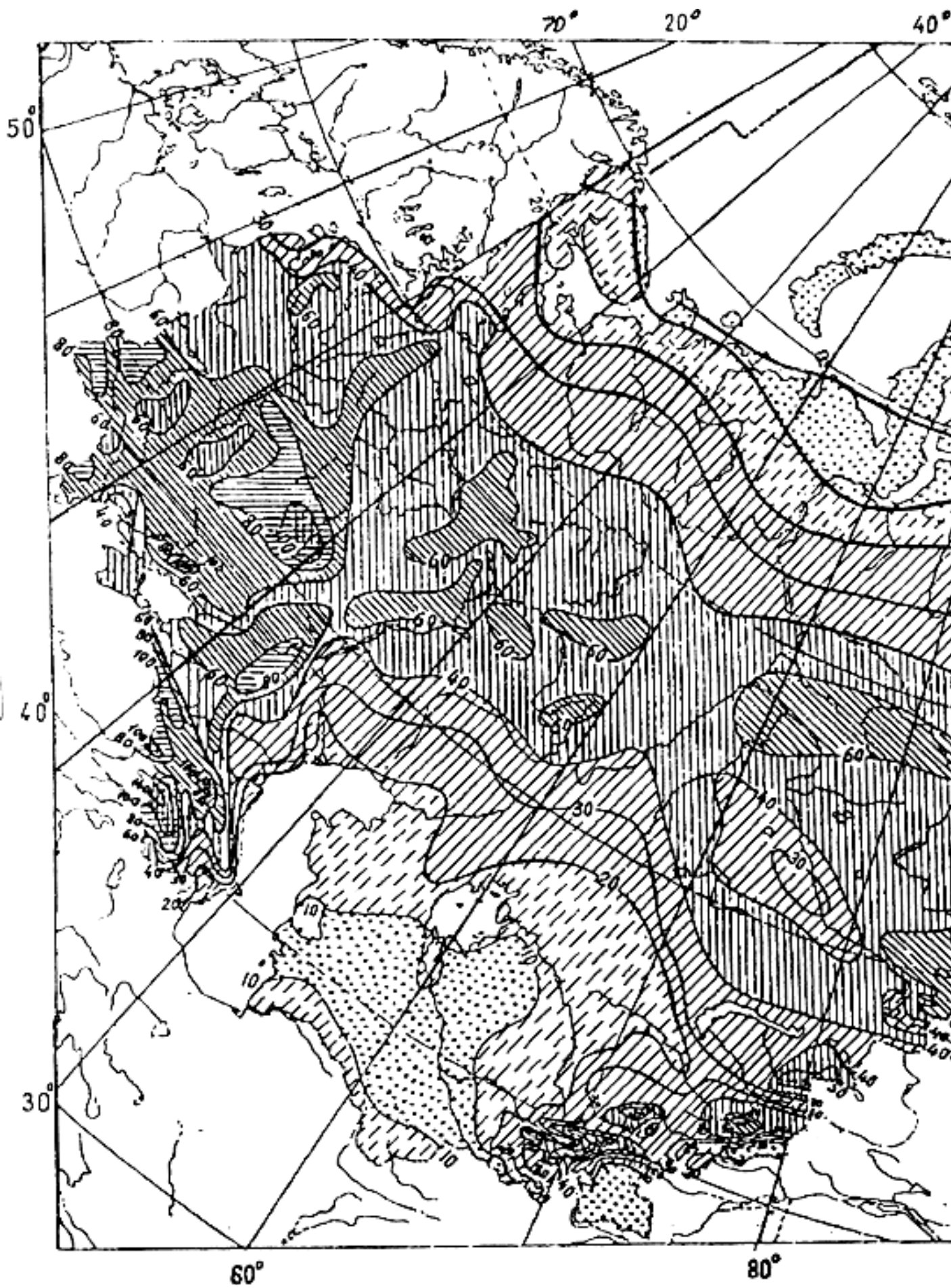
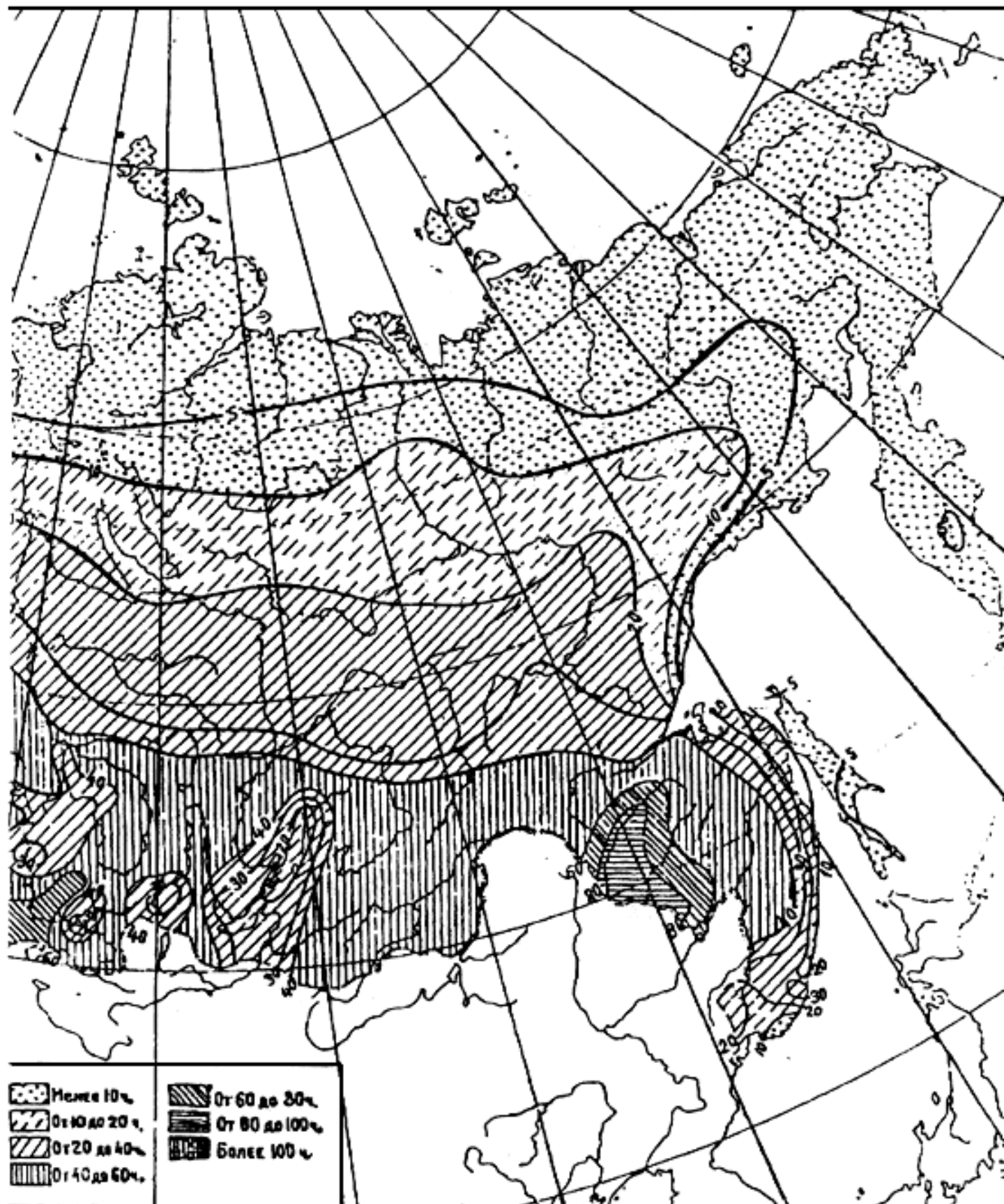


Рис.6.8. Карта годовой продолжительности гроз в часах для территории бывшего СССР

60° 80° 100° 120° 140° 160° 180°



100°

120°

Продолжение рис.6.8

В настоящее время появилась возможность для разработки более детальных региональных карт $N_{г.ч}$. На рис.6.9, а в качестве примера представлена региональная карта $N_{г.ч}$ с интервалом между изолиниями 5 часов для Ленинградской области, разработанная в отделе прикладной климатологии Главной геофизической обсерватории (ГГО). Карта построена в масштабе 1:500000 с привлечением данных наблюдений за грозой за 40-50-летний период по 140 гидрометеорологическим станциям и постам, расположенным на территории Ленинградской области и в пограничных районах. Для сравнения на рис.6.9, б изображен фрагмент карты $N_{г.ч}$ по территории бывшего СССР для Ленинградской области.

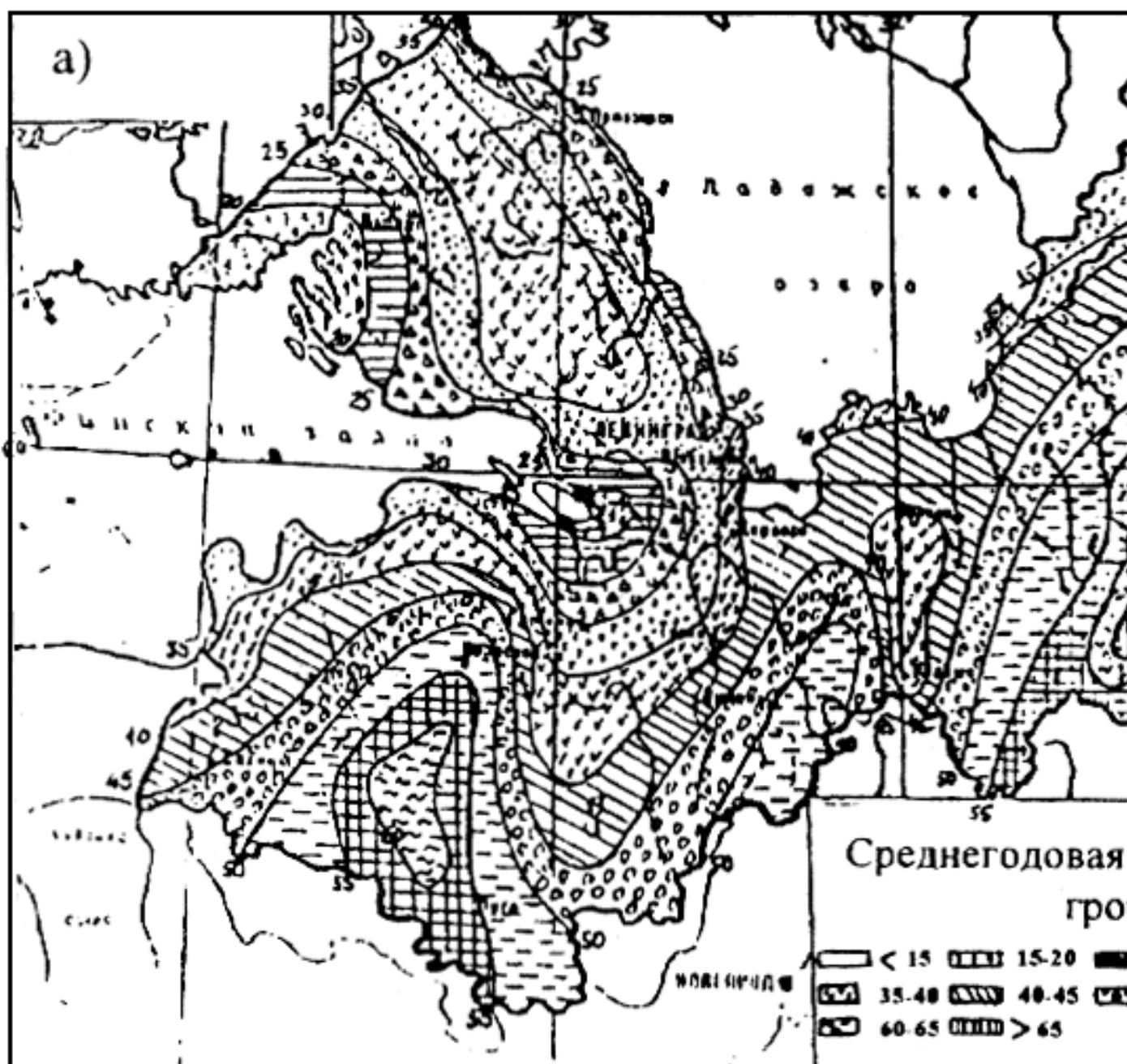


Рис.6.9. Среднегодовая продолжительность гроз в часах ($N_{г.ч}$) на территории Ленинградской области:

- а) региональная карта (разработана ГГО в масштабе 1:500000);
- б) фрагмент карты из ПУЭ-1998 (разработана ВНИИЭ в масштабе 1:10000000)

6.3.4. В тех случаях, когда имеются данные только о числе дней с грозой $N_{г.д}$ (например, при сопоставлении опыта эксплуатации зарубежных и отечественных ВЛ), пересчет к числу грозных часов производится по формуле

$$N_{г.ч} = 0,72 N_{г.д}^{1,3} \quad (6.11)$$

6.3.5. При проектировании и сопоставлении расчетных и эксплуатационных показателей грозоупорности ВЛ и ПС рекомендуется использовать данные наблюдений за грозой гидрометеостанций, наиболее близко расположенных к трассе ВЛ или территории ПС. В первом случае используется среднемноголетнее число грозных часов не менее чем за 30 лет, а во втором - фактическое число грозных часов за каждый анализируемый год.

6.3.6. При оценке продолжительности гроз вдоль трассы ВЛ приходится считаться с неоднородностью сети ГМС и удаленностью отдельных ГМС от трассы на расстояние, превышающее радиус обнаружения грозы (порядка 15 км), т.е. условно относить отдельные участки трассы к зоне "охвата" ближайшей ГМС (см. Приложение 13, рис.П13.1).

В пределах практических зон "охвата" ГМС могут быть отдельные области, в которых интенсивность грозовой деятельности в силу местных условий заметно отличается от показателей, фиксируемых ближайшей ГМС. Правильная оценка интенсивности грозовой деятельности в таких случаях возможна только на основе специального анализа, учитывающего географические и климатические особенности местности, наличие крупных водоемов и рек. Такой анализ может оказаться полезным для выявления причин пониженной грозоупорности ВЛ.

6.4. Грозопоражаемость воздушных линий

6.4.1. Возвышаясь над окружающей местностью, ВЛ поражается разрядами, развивающимися непосредственно над ней, и "стягивает" боковые разряды.

Число "прямых" ударов в линию $N_{п}$ зависит от плотности разрядов молнии на землю p_0 , расстояния между тросами (или проводами на ВЛ без троса) $d_{тр-тр}$ и длины линии L следующим образом:

$$N_{п} = p_0 L d_{тр-тр} \quad (6.12)$$

где p_0 - плотность разрядов молнии на землю; L - длина линии; $d_{тр-тр}$ - расстояние между тросами (или проводами для бестросовой линии).

Вероятность поражения ВЛ боковым разрядом зависит от амплитуды тока молнии I_i и высоты подвеса тросов и проводов. Чем больше I_i и высота ВЛ, тем с большего расстояния разряд молнии ориентируется на ВЛ. В расчетах числа боковых ударов молнии $N_{Б}$

используется эквивалентная ширина полосы стягивания $R_{\text{ЭКВ}}$, пропорциональная средней высоте подвеса троса $h_{\text{ср}}$ и вычисляемая по формуле:

$$N_{\text{Б}} = 2p_0 L R_{\text{ЭКВ}} = 2p_0 L k_h h_{\text{ср}}. \quad (6.13)$$

С увеличением высоты поражаемого объекта значение $k_h = R_{\text{ЭКВ}} / h$ уменьшается. На рис.6.10 показана зависимость k_h от h , полученная по результатам обобщения данных по поражаемости объектов (ВЛ и молниеотводов) различной высоты.

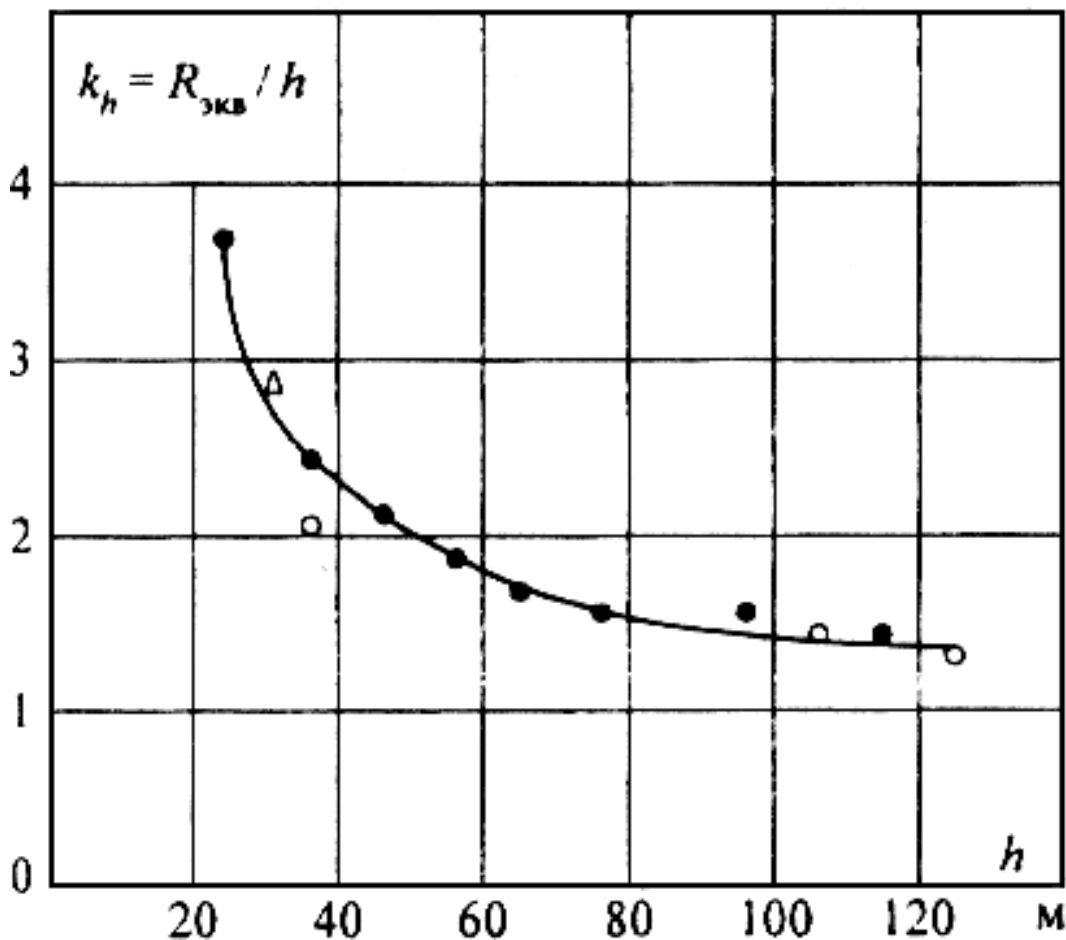


Рис.6.10. Зависимость отношения ширины полосы, с которой ВЛ собирает боковые разряды молний

с одной стороны от ВЛ ($R_{\text{ЭКВ}}$), к высоте опор по данным полевых исследований:

- бывшая Чехословакия; ○ Польша; △ Украина

Число ударов молнии на 100 км длины ВЛ рассчитывается по формулам:

$$N = 0,2 p_0 \left(\frac{d_{\text{тр-тр}}}{2} + 5h_{\text{ср}} - \frac{2h_{\text{ср}}^2}{30} \right); \quad (6.14)$$

при $h_{\text{ср}} \leq 30$ м

$$\text{при } h_{\text{ср}} > 30 \text{ м} \quad N = 0,15 p_o \left(\frac{d_{\text{тр-тр}}}{2} + h_{\text{ср}} + 90 \right), \quad (6.15)$$

где p_o - плотность разрядов молнии на землю определяется по рекомендациям подраздела 6.3; $d_{\text{тр-тр}}$ - расстояние между тросами (или проводами на бестросовой линии), м. Для ВЛ с одним тросом $d_{\text{тр-тр}} = 0$; $h_{\text{ср}}$ - средняя высота подвеса троса или провода, м; рассчитывается по рекомендациям Приложения 16 (п.16.2).

РАЗДЕЛ 7. ПОКАЗАТЕЛИ ГРОЗОУПОРНОСТИ И СРЕДСТВА ГРОЗОЗАЩИТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Показателем грозоупорности ВЛ является число ее грозовых отключений. В проектной и эксплуатационной практике, в зависимости от рассматриваемой задачи, могут использоваться:

- удельное число грозовых отключений N_{Γ} , рассчитанное на 100 км и 100 грозовых часов в год. Этот показатель обычно используется для сравнения расчетных или эксплуатационных показателей грозоупорности ВЛ, различающихся по конструктивному выполнению и классу номинального напряжения;

- удельное число грозовых отключений на 100 км и один год эксплуатации N'_{Γ} . Этот показатель удобен, например, для сопоставления грозоупорности ВЛ в одной энергосистеме;

- абсолютное число грозовых отключений N_{Γ} , рассчитанное на фактическую длину ВЛ (L) и фактическую интенсивность грозовой деятельности, т.е. число грозовых отключений за анализируемый период, отнесенное к продолжительности этого периода в годах. Этот показатель необходим, например, при выборе средств грозозащиты или при сопоставлении расчетных и эксплуатационных показателей грозоупорности.

7.1. Влияние конструктивных параметров ВЛ на показатели ее грозоупорности

Взаимосвязь показателей грозоупорности и конструкции ВЛ наиболее ярко проявляется для ВЛ напряжением 110 кВ и выше, выполненных на металлических и железобетонных опорах и защищенных тросом.

7.1.1. На ВЛ, защищенной тросом, возможны грозовые отключения от ударов в опору ($N_{\text{оп}}$), трос ($N_{\text{тр}}$) и прорыва молнии на провода ($N_{\text{пр}}$). При ударе в опору возникают обратные перекрытия линейной изоляции из-за перенапряжений, возникающих при протекании тока молнии по опоре. По последствиям для изоляции к этой категории относятся и удары в прилегающие к опоре участки троса. При ударе молнии в трос в средней части пролета возникают перенапряжения на воздушном промежутке трос-провод и, после пробега по пролету и стекании тока молнии по опоре, на линейной изоляции. Расстояние между тросом и проводом в середине пролета по вертикали нормируется ПУЭ по условиям грозозащиты в зависимости от длины пролета (п.2.5.66): до и после прихода в точку удара волны перенапряжений, отраженной от опоры с противоположным знаком, напряжение на воздушном промежутке не должно достигать его пробивного значения, поэтому число грозовых отключений от ударов молнии в средней части пролета ($N_{\text{тр}}$) рассчитывается, как

правило, по вероятности обратного перекрытия линейной изоляции на опоре. Оценка числа грозных отключений от перекрытий воздушного промежутка при ударах в трос (N_S) может оказаться необходимой в некоторых специальных случаях: при отступлении от требований ПУЭ, при разработке новых конструкций опор и т.д. Алгоритм расчета N_S дан в Приложении 20 применительно к переходному пролету ВЛ. Методика расчета отдельных составляющих общего числа грозных отключений ($N_{оп}$, $N_{тр}$ и $N_{пр}$) приведена в Приложении 17.

7.1.2. Критические значения тока молнии, приводящие к перекрытию линейной изоляции, при прорывах молнии на провода невелики: изоляция ВЛ 110-330 кВ перекрывается при амплитуде тока молнии от 3 до 10 кА и выше, для изоляции ВЛ 500-1150 кВ опасен ток молнии от (15-35) кА. Практически каждый удар молнии в провод ВЛ 110 кВ вызывает перекрытие изоляции, опасными при прорывах молнии на провода ВЛ 1150 кВ являются 30-40% разрядов молнии. Таким образом, высокая импульсная прочность линейной изоляции ВЛ 500-1150 кВ не обеспечивает их грозоупорности при прорывах молнии на провода.

7.1.3. Обратные перекрытия возникают при значительно большей амплитуде тока молнии. Например, изоляция ВЛ 110 кВ перекрывается при ударах молнии в опору с током, достигающим нескольких десятков килоампер. При удалении точки удара молнии от опоры к середине пролета вероятность обратного перекрытия изоляции уменьшается из-за распределения тока молнии между двумя опорами, снижения крутизны тока за счет потерь на импульсную корону при пробеге по тросу и удаленности канала молнии.

7.1.4. Вероятность прорыва молнии на провода зависит от числа и расположения тросов относительно проводов (угла защиты α и превышения троса над проводом Δh) и высоты опоры $h_{оп}$. Эффективность тросовой защиты от прорывов возрастает с уменьшением $h_{оп}$ и α и увеличением Δh . На ВЛ 500-1150 кВ вероятность прорыва молнии на провода может возрастать под влиянием рабочего напряжения проводов, способствующего возникновению и прорастанию встречного лидера.

7.1.5. Распределение ударов молнии между опорой и тросом в пролете зависит от соотношения высоты опоры и длины пролета. При увеличении длины пролета уменьшается доля ударов молнии в опоры, т.е. ударов с повышенной вероятностью обратного перекрытия.

7.1.6. На вероятность обратного перекрытия изоляции влияют следующие конструктивные параметры ВЛ:

- импульсная прочность линейной изоляции, зависящая от класса номинального напряжения ВЛ. Эта зависимость выражена значительно сильнее, чем при прорывах молнии на провода, так как с ростом импульсной прочности значения опасных для изоляции амплитуд тока молнии изменяются от десятков килоампер (для ВЛ 110 кВ), имеющих вероятность появления (0,3-0,4), до сотен килоампер (для ВЛ 500 кВ и выше) - с вероятностью появления 0,05 и менее;

- тип и размеры опоры (с увеличением высоты опоры возрастает поражаемость ВЛ разрядами молнии и увеличивается индуктивность опоры; одностоечные железобетонные и стальные опоры имеют большую индуктивность, чем порталные или опоры с оттяжками; наибольшую индуктивность на единицу длины имеют одностоечные железобетонные опоры, но такие опоры обычно имеют меньшую высоту);

- тросовая защита (подвеска троса за счет электростатического экранирования снижает разность потенциалов на линейной изоляции и уменьшает долю тока молнии, стекающего по

опоре, что способствует снижению падения напряжения на индуктивности и сопротивлении заземления опоры; эффективность тросов возрастает при увеличении числа тросов, разнесении их на большее расстояние по горизонтали и приближении к проводам по вертикали);

- сопротивление заземления опоры (уменьшение значений сопротивления заземления R_3 приводит к снижению перенапряжений на изоляции ВЛ; меньшие значения R_3 необходимо обеспечить на ВЛ, выполненных на одностоечных опорах, имеющих более высокую поражаемость разрядами молнии и большую индуктивность опор. Наиболее жесткие требования следует предъявлять к R_3 для ВЛ 110 кВ, выполняемых в настоящее время исключительно на одностоечных опорах и имеющих сравнительно невысокую импульсную прочность линейной изоляции).

7.1.7. Соотношение числа отключений из-за обратных перекрытий ($n_{оп} + n_{тр}$) и прорывов $n_{пр}$ зависит от класса номинального напряжения U_n и конструкции ВЛ (типа опоры, числа и расположения тросов, сопротивления заземления). С ростом U_n и повышением импульсной прочности линейной изоляции повышается общая грозоупорность ВЛ и снижается доля отключений от обратных перекрытий.

7.2. Влияние природно-климатических условий и особенностей трассы на показатели грозоупорности ВЛ

7.2.1. Основными природно-климатическими характеристиками, влияющими на показатели грозоупорности ВЛ, являются интенсивность грозовой деятельности, статистическое распределение амплитуды тока молнии и электрофизические характеристики грунтов в районе прохождения трассы ВЛ (удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость и пробивная электрическая прочность грунта).

В настоящее время объем накопленных регистраций амплитуд тока молнии I недостаточен для построения статистических распределений I для регионов с различными природно-климатическими условиями, поэтому в практических методиках расчета учтена только зависимость статистического распределения от высоты опор ВЛ. Учет региональных особенностей грунтов обычно производится на стадии проектирования ВЛ по материалам вертикального электроразведывания.

7.2.2. На показатели грозоупорности могут влиять такие особенности трассы ВЛ, какхождение ВЛ в одном коридоре с другими ВЛ, в том числе и на более высоких опорах, или экранировка ВЛ городской застройкой и лесным массивом. Во всех указанных случаях поражаемость ВЛ разрядами молнии уменьшается по сравнению с ВЛ, проходящей по открытой местности. Поражаемость разрядами молнии каждой из двух одинаковых ВЛ, идущих в одном коридоре, составляет около половины поражаемости отдельно идущей ВЛ.

Показатели грозоупорности экранируемых ВЛ улучшаются также за счет более благоприятного статистического распределения амплитуды тока молнии разрядов, поражающих ВЛ: опасные для линейной изоляции разряды с большими значениями I , ориентирующиеся на наземные объекты с больших высот, поражают преимущественно близко расположенные к ВЛ высокие объекты (здания городской застройки или лесной массив). Указанные обстоятельства могут быть причиной значительного расхождения расчетных и эксплуатационных показателей грозоупорности из-за невозможности учета в

существующих методиках таких особенностей трассы ВЛ.

Например, по данным обработки опыта эксплуатации отношение числа грозовых отключений ВЛ 110-220 кВ, экранируемых лесом и идущих по открытой местности, характеризуется следующими значениями:

Опора:	ВЛ с тросом	ВЛ без троса
портальная	0,50	0,40
одностоечная одноцепная	0,70	0,60
одностоечная двухцепная	0,75	0,70

7.3. Эксплуатационные показатели грозоупорности ВЛ 110-750 кВ

В настоящее время опыт эксплуатации ВЛ 110-750 кВ характеризуется следующими удельными показателями по числу отключений (табл.7.1*): $N_{\text{общ}}$ - число отключений по всем причинам; N'_{Γ} - число грозовых отключений. Большой разброс эксплуатационных показателей грозоупорности ВЛ 110-330 кВ по регионам является следствием местных условий по уровню грозовой деятельности и характеристикам грунта, а также различий в конструкции опор.

* За исключением некоторых ВЛ 330 кВ, опыт эксплуатации относится к ВЛ, проходящим в районах с хорошими грунтами.

Таблица 7.1

Эксплуатационные показатели ВЛ 110-750 кВ по отключениям (на 100 км и 1 год эксплуатации)

$U_{\text{н}}$, кВ	Число отключений на 100 км и 1 год эксплуатации				Доля грозовых отключений, %	
	$N_{\text{общ}}$		N'_{Γ}		Пределы изменения	Средняя
	Пределы изменения	Среднее	Пределы изменения	Среднее		
110	3,5-14,4	9,0	0,33-2,3	1,0	4,5-22,5	12
220	1,3-5,8	3,0	0,03-1,2	0,45	1,2-30,0	15
330	0,4-3,0	2,0	0,10-0,66	0,20	4,3-51,1	10
500		0,6		0,08		15
750		0,24		0,07		30

--	--	--	--	--	--	--

7.4. Средства грозозащиты воздушных линий

В качестве основных средств грозозащиты ВЛ используются:

- подвеска заземленных тросов,
- снижение сопротивления заземления опор,
- повышение импульсной прочности линейной изоляции,
- защита отдельных опор и участков с ослабленной изоляцией,
- ограничители перенапряжений (ОПН).

Резервным средством повышения надежности и бесперебойности работы ВЛ является автоматическое повторное включение (АПВ), в особенности быстродействующее (БАПВ) и однофазное (ОАПВ). Коэффициент успешности АПВ при грозовых отключениях, по данным опыта эксплуатации, для ВЛ 110-500 кВ составляет в среднем 0,6-0,8, а для ВЛ 750 и 1150 кВ - 0,8-0,9. АПВ позволяет частично компенсировать низкую грозоупорность ВЛ при трудностях устройства хороших заземлений и т.п. Однако применение АПВ не должно исключать использование основных средств грозозащиты, так как к.з. снижают ресурс оборудования ПС.

7.4.1. Подвеска заземленных тросов позволяет уменьшить в сотни раз число ударов молнии непосредственно в провода, представляющих наибольшую опасность для изоляции ВЛ: в этом случае гирлянды ВЛ 110-1150 кВ перекрываются при небольших токах молнии (от нескольких килоампер до 30 кА).

Расположение тросов относительно проводов должно обеспечить наибольшую эффективность тросовой защиты при преобладающем для данной ВЛ типе грозовых отключений (прорывы или обратные перекрытия, см. п.7.1.7). В первом случае снижение вероятности прорыва достигается уменьшением угла защиты троса (тросов), в том числе подвеской тросов с отрицательным углом защиты, и увеличением расстояния между тросом и проводом по вертикали. Во втором случае вероятность обратного перекрытия уменьшается при увеличении числа тросов, разнесении их на большее расстояние, в том числе при подвеске части тросов под проводами. Перечисленные мероприятия способствуют уменьшению импульсного тока через опору и усиливают электростатическое экранирование проводов тросами.

7.4.2. На ВЛ, ранее выполненных на деревянных опорах, трос подвешивался только на подходах к ПС, так как грозоупорность ВЛ на деревянных опорах без троса достаточно высока (грозовые отключения происходят только при междуфазном перекрытии по двум гирляндам и участку траверсы). В процессе эксплуатации грозоупорность и надежность ВЛ резко снижаются из-за расщепления и загнивания стоек и траверс, что требует больших трудозатрат на ремонт ВЛ. Для нового электросетевого строительства рекомендуется только комбинированные деревянные опоры (с грозозащитным тросом - одним или двумя, стальными траверсами, железобетонными фундаментами и стальным заземляющим спуском - разработка НИИПТ); у ВЛ с такими опорами грозоупорность и надежность примерно те же, что у ВЛ со стальными и железобетонными опорами.

7.4.3. Применение грозозащитного троса на ВЛ 6-35 кВ малоэффективно из-за низкой импульсной прочности линейной изоляции и, соответственно, высокой вероятности обратного перекрытия при ударе в опору и трос.

7.4.4. Для снижения потерь энергии от индуктированных в тросах токов, а также для использования тросов в качестве канала высокочастотной связи или в целях емкостного отбора мощности грозозащитный трос крепится к опоре на изоляторах, снабженных

шунтирующими искровыми промежутками. При разряде молнии искровые промежутки пробиваются уже во время развития лидерного канала, и в стадии главного разряда трос работает как заземленный наглухо.

7.4.5. Снижение сопротивлений заземления опор ВЛ с тросом является одним из основных средств уменьшения вероятности импульсного перекрытия изоляции при ударе молнии в трос или опору. Исключением являются ВЛ или участки на очень высоких опорах (переходы через реки и т.п.), грозоупорность которых в значительной мере определяется индуктивностью опор.

7.4.6. В тех случаях, когда не удается осуществить низкое сопротивление заземления опор, тросовая защита может оказаться малоэффективной, так как большинство ударов молнии в трос или опору будет приводить к перекрытиям изоляции.

7.4.7. Сопротивление заземления металлических и железобетонных опор на ВЛ без троса должно быть по возможности низким. Это способствует уменьшению вероятности перекрытия изоляции при ударах в опору и уменьшению вероятности перехода однофазных перекрытий в многофазные при ударах молнии в опоры и провода.

7.4.8. В обычных грунтах с удельным сопротивлением не более 100-300 Ом·м выполнение заземлений опор с достаточно низким сопротивлением не вызывает больших трудностей и их стоимость невысока. В сухих песчаных и скальных грунтах для этого приходится применять глубинные вертикальные заземлители, достигающие хорошо проводящих слоев грунта, или горизонтальные (лучевые) заземлители длиной до 60 м. Применение сплошных противовесов, проложенных в земле от опоры к опоре, часто неэкономично, так как даже в грунтах высокого удельного сопротивления большая часть импульсного тока стекает с противовеса в землю на участке 60-100 м от опоры. Прокладка параллельных лучей нецелесообразна из-за снижения коэффициента их использования вследствие взаимного экранирования. При применении двух лучей их следует направлять в противоположные стороны вдоль оси ВЛ. Электромагнитная связь между проводами ВЛ и лучами в земле не оказывает существенного влияния на эффективность заземлителя.

Для повышения грозоупорности ВЛ, проходящих в районах с высоким удельным сопротивлением грунта, по совокупности факторов (трудности прокладки, повреждаемость в эксплуатации, низкая эффективность при стекании тока молнии) можно увеличить число тросов (с подвеской одного или двух из них под проводами).

7.4.9. Импульсная прочность изоляции ВЛ с тросом определяется типом изоляторов, длиной гирлянды, длиной воздушных промежутков на опоре и промежутка трос-провод в пролете. Тип изоляторов и длина гирлянды для ВЛ всех классов напряжения выбираются не по соображениям грозозащиты, а по рабочему напряжению. Увеличение длины гирлянды и скоординированных с ней воздушных промежутков на опоре повышает капитальные затраты и практически не используется как средство грозозащиты.

7.4.10. Изоляцию очень высоких переходных опор, выбранную по рабочему напряжению, рекомендуется усиливать на 15%. Эта мера позволяет компенсировать накапливаемые в эксплуатации поврежденные изоляторы и исключить проведение труднодоступных профилактических и ремонтных работ по замене изоляторов на переходных опорах в течение 25 лет.

7.4.11. Грозоупорность ВЛ 6-35 кВ на железобетонных и металлических опорах существенно повышается при использовании для подвески нижних проводов изоляционных траверс из пластических материалов.

7.4.12. Особое внимание уделяется защите опор с ослабленной изоляцией. На ранее построенных ВЛ с деревянными опорами без троса к ним относятся: отдельные металлические или железобетонные опоры; опоры, ограничивающие тросовый подход к ПС;

опоры отпаек, подключенных через трехполюсные разъединители, скомплектованные на металлической раме; транспозиционные опоры. К ослабленной изоляции относятся также воздушные промежутки, образующиеся при пересечении воздушных линий между собой.

При наличии на трассе опор с ослабленной изоляцией грозоупорность ВЛ снижается вследствие увеличения вероятности перекрытия ослабленной изоляции при ударе молнии в такую опору и от волн атмосферных перенапряжений, набегających на нее с прилегающих участков трассы с нормальной изоляцией.

Защита опор с ослабленной изоляцией ранее осуществлялась с помощью трубчатых разрядников, обеспечивающих гашение дуги после импульсного перекрытия. Недостатком трубчатых разрядников является нестабильность их характеристик, что нередко приводит к развитию аварий при отказе и разрушении разрядников. Обслуживание трубчатых разрядников трудоемко. Более перспективно использование ОПН. Опоры с ослабленной изоляцией могут защищаться также специально предусмотренными искровыми промежутками.

7.4.13. Грозозащита пересечений ВЛ между собой и с линиями электрифицированного транспорта и связи обеспечивается соблюдением нормированных расстояний по воздуху. Кроме того, на ВЛ с деревянными опорами и АПВ для ограничения амплитуды перенапряжений применялись разрядники или искровые промежутки, установленные на опорах, ограничивающих пролет пересечения. В настоящее время более удобны ОПН (см. п.7.4.14).

7.4.14. Дополнительным средством повышения грозоупорности ВЛ могут служить ОПН, устанавливаемые непосредственно на опорах ВЛ. Применение ОПН на ВЛ наиболее эффективно в следующих случаях:

- на одной из цепей двухцепной ВЛ, что практически полностью предотвращает грозовые отключения одновременно двух цепей;
- при высоком сопротивлении заземления опор;
- на высоких опорах, например, на переходах через водные преграды.

При этом ОПН могут устанавливаться либо на всех фазах каждой опоры, либо на части опор или только на одной или двух фазах.

РАЗДЕЛ 8. ВЫБОР СРЕДСТВ ГРОЗОЗАЩИТЫ ВЛ 110 кВ И ВЫШЕ

8.1. Оценка грозоупорности ВЛ 110-750 кВ по справочным кривым

8.1.1. В Приложении 23 представлены справочные кривые, построенные по результатам расчета на ЭВМ грозоупорности ВЛ 110-750 кВ на металлических и железобетонных опорах, вошедших в унификацию опор, разработанную Институтом "Энергосетьпроект" в течение 1968-1984 годов, а также для типовых опор, разработанных после появления этой унификации и выпускаемых заводами. Схемы опор и необходимая для пользования справочными кривыми информация даны в табл.8.1, в которой указаны: шифр опоры, выбранной в качестве расчетного варианта для данной конструкции опор (промежуточная без

подставки); расчетная длина пролета $l_{\text{прод}}$, равная 0,89 среднего значения габаритного пролета; номер таблицы с информацией для расчета сопротивления заземления опор; номер рисунка с результатами расчета удельного числа грозовых отключений ВЛ на 100 км и 100 грозовых часов $N_{\text{г}}$. Расчеты выполнены по методике, изложенной в Приложениях 17 и 18, соответственно, для ВЛ с тросом и без троса.








Таблица 8.1

Состав исходных данных для расчета показателей грозоупорности ВЛ 110-750 кВ на

унифицированных

и типовых опор: шифр опоры (расчетная длина пролета), номер таблицы к расчету сопротивления

типового заземлителя, номер рисунка справочных кривых удельного числа грозовых отключений

Класс напряжения, кВ	Стальные опоры						
							
110	П 110-5В (235 м) табл.П15.6, рис.П23.1	-	П 110-2В (300 м) табл.П15.6; рис.П23.2	-	-	-	-
150	П 150-1В (300 м) табл.П15.6; рис.П23.5	-	П 150-2В (300 м) табл.П15.6; рис.П23.6	-	-	-	-
220	П 220-3 (400 м) табл.П15.6; рис.П23.10	П 220-3Т (400 м) табл.П15.6; рис.П23.11	П 220-2 (365 м) табл.П15.6; рис.П23.12	П 220-2Т (365 м) табл.П15.6; рис.П23.13	П 220-5 (400 м) табл.П15.6; рис.П23.14	-	-
330	П 330-3 (415 м) табл.П15.6; рис.П23.19	П 330-3Т (415 м) табл.П15.6. рис.П23.20	П 330-2 (345 м) табл.П15.6; рис.П23.21	П 330-2Т (345 м) табл.П15.6; рис.П23.22	-	П 330-9 (380 м) табл.П15. 7; рис.П23.2 3	-
500	-	-	-	-	-	ПБ-1 (395 м) табл.П15. 7; рис.П23.2	Р1 (360 м) табл.П15. 8; рис.П23.2

						6	7
750		-	-			ПП 750-1 (385 м) табл.П15. 7; рис.П23.2 1	
Класс напряжения , кВ	Железобетонные опоры						
	Одностоечные		Портальные				
			Одноцепные		Двухцепные		
	