МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт *Высокоточных систем им. В.П. Грязева*
Кафедра «*Электроэнергетика*»

Утверждено на заседании кафедры
«*Электроэнергетика*»
«_23_» *января* 20*19*г., протокол №_*1*

Заведующий кафедрой

_____*В.М. Степанов*

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению курсовой работы
по дисциплине (модулю)
«*Техника высоких напряжений***»**

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы магистратуры

по направлению подготовки
13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

с направленностью (профилем)
Электроэнергетические системы и сети

Форма(ы) обучения: *очная, заочная*

Идентификационный номер образовательной программы: 130402-05-19

Тула 2019 год

Разработчик методических материалов

Косырихин В.С. доцент, к.т.н.

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание) *(подпись*

Введение

Нелинейные ограничители перенапряжений (далее ОПН или ограничитель) предназначены для использования в качестве основного средства защиты электрооборудования электрических станций и сетей от коммутационных и грозовых перенапряжений.

В соответствии с существующими программами технического перевооружения и реконструкции электросетевых объектов вентильные разрядники заменяются нелинейными ограничителями перенапряжений. Основным отличием ОПН от вентильных разрядников является отсутствие искровых промежутков, более высокая нелинейность вольт-амперной характеристики, способность ограничивать как грозовые, так и коммутационные перенапряжения.

Из-за отсутствия искровых промежутков варисторы ограничителя находятся все время под напряжением сети и ток через них, имеющий в нормальном режиме емкостный характер и значение, не превышающее одного миллиампера, при воздействии коммутационных и грозовых перенапряжений возрастает до нескольких сотен и тысяч ампер. Поэтому выбор ОПН более сложен, чем вентильных разрядников, и определяется энергетическими воздействиями на него в коммутационных, грозовых и других режимах работы электрической сети. При выборе ОПН в зависимости от его места установки необходимо учитывать электрическую схему подстанции, режимы ее работы, возможные оперативные и аварийные коммутации, схему электрической сети, в которой работает подстанция, и многие другие факторы, влияющие на надежность работы ОПН. В ряде случаев требуется выполнять довольно сложные расчеты квазиустановившихся перенапряжений, от которых должен быть отстроен ОПН.

Выполняя курсовую работу или проект, студент решает конкретные задачи по профилю своей специальности, закрепляя теоретические знания, полученные при изучении специальных дисциплин.

В соответствии с содержанием курсовой работы методические указания состоят из трех основных разделов:

– выбор основных параметров ОПН;

– квазиустановившиеся перенапряжения и их расчет;

– расчет срока службы ОПН.

Методические указания составлены на основе нормативных документов [1÷4], методических указаний, выпущенных РАО «ЕЭС России» [5, 6], а также некоторых ведомственных инструкций.

Перед началом выполнения расчетов студент должен внимательно изучить выданный вариант задания и подготовить необходимые для

расчета исходные данные. Проанализировать работу предложенной электропередачи и составить ее расчетную схему, для которой определить перечень возможных режимов работы, вызывающих квазиустановившиеся перенапряжения. Произвести расчет квазиустановившихся перенапряжений, руководствуясь данными методическими указаниями. Базируясь на результатах выполненных расчетов и используя рекомендации, изложенные ниже, выбрать ОПН соответствующего типоисполнения. Рассчитать срок службы выбранного ОПН, сопоставить его с нормированным значением и сделать заключение о пригодности выбранного ограничителя.

Выполненную работу необходимо оформить в виде расчетно-пояснительной записки. При работе над курсовой работой для выполнения расчетов рекомендуется использовать программу Matcad, при оформлении записки – Microsoft Word.

При защите курсовой работы студент должен обосновать все принятые проектные решения и результаты расчетов.

1. Выбор ОПН для защиты оборудования подстанций 110 кВ и выше

1.1. Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН

Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН, применяемых в сетях с глухозаземленной нейтралью, должно быть взято с 5 %–м запасом по отношению к наибольшему рабочему фазному напряжению сети (табл. 1.1), если $U_{нрф} > U_{нс}$.

Таблица 1.1. **Значения наибольшего рабочего фазного напряжения сети**

$U_{ном}$, кВ	110	220	330	500	750
$U_{нрф}$, кВ	73	146	210	303	455

Если наибольший уровень напряжения в сети в месте установки ОПН $U_{нс} > U_{нр}$, то

$$U_{нро} = (1{,}02 \div 1{,}05)U_{нс},$$

где $U_{нс}$ – наибольшее возможное фазное напряжение сети, полученное на основании замеров или расчетов для режимов суточного минимума нагрузки во время летнего периода с учетом вывода в ремонт средств компенсации реактивной мощности на подстанции [6].

В сетях с эффективно заземленной нейтралью, если на подстанции часть трансформаторов (110÷220)/(6÷35) работают с разземленной нейтралью со стороны 110÷220 кВ, то наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН должно быть на 10÷20 % выше наибольшего рабочего фазного напряжения. Если на подстанции все трансформаторы работают с разземленной нейтралью, то рекомендуется [7] принять $U_{нро} = 1{,}2U_{нрф}$.

Рекомендуемые значения наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН для сетей с различными способами заземления нейтрали приведены в табл. 1.2, 1.3.

Таблица 1.2. **Рекомендуемые значения наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН, применяемых в сетях с глухозаземленной нейтралью**

$U_{ном}$, кВ	110	220	330	500	750
$U_{нро}$, кВ	77	153	220	318	477

Таблица 1.3. **Рекомендуемые значения наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН, применяемых в сетях с эффективно заземленной нейтралью**

$U_{ном}$, кВ	110	220
$U_{нро}$, кВ	80÷88	160÷176

1.2. Выбор класса энергоемкости ОПН

Критерием оценки энергоемкости ОПН является его способность пропускать нормируемые импульсы тока (прямоугольный импульс длительностью 2000 мкс) коммутационного перенапряжения без потери рабочих качеств.

Установка ОПН повышенной энергоемкости (не ниже 4÷4,5 кДж/кВ$U_н$) требуется в следующих случаях [6]:

- если при коммутациях линий, блока *линия – трансформатор* возможно возникновение переходного феррорезонанса;
- при установке ОПН в сетях 110 кВ с частично разземленными нейтралями трансформаторов без выключателей на стороне высокого напряжения;
- в схемах ОРУ «квадрат», «треугольник», «мостик», «одинарная система шин», «шины – трансформатор», «полуторная», где возможна неполнофазная коммутация линии с подключенным трансформатором или автотрансформатором при отказе выключателей между линией и трансформатором;
- на присоединениях к РУ ВЛ 500÷750 кВ длиной более 200÷300 км;
- на РУ, имеющих батареи конденсаторов;
- на электропередачах с УПК.

В остальных случаях возможно применение ОПН с энергоемкостью, значения которой указаны в табл. 1.4 [7].

В соответствии с рекомендациями разд. 1.1 и 1.2 осуществляется предварительный выбор типа ОПН и его изготовителя (табл. П1). Далее должна быть проведена проверка на достаточность других его характеристик условиям эксплуатации.

Таблица 1.4. **Рекомендуемые значения удельной энергоемкости ОПН и тока пропускной способности для упрощенного выбора**

$U_{ном}$, кВ	110	220	330	500	750
$W_{уопн}$, кДж/кВ$U_{нро}$	1,5÷2,5	2,5÷3,5	3,5÷4,5	4,5÷5,5	5,5÷6,5
I_{2000}, А	400÷500	500÷600	700÷900	1000÷1200	1300÷1500

1.3. Проверка на соответствие характеристики «напряжение – время» выбранного ОПН квазиустановившимся перенапряжениям

Выбранный ограничитель должен быть проверен на соответствие характеристики «напряжение – время» квазиустановившимся перенапряжениям при различных видах коммутаций с учетом времени действия релейной защиты, линейной и противоаварийной автоматики.

Наибольшее длительно допустимое напряжение ОПН $U_{нро}$ или его номинальное напряжение $U_н$ должны быть выбраны такими, чтобы характеристика «напряжение – время» ОПН лежала выше характеристики «напряжение – время» сети (рис. 1.1).

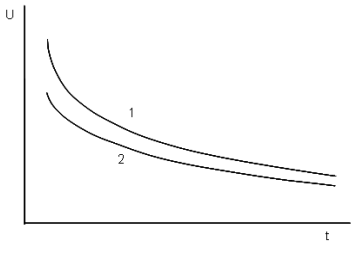


Рис. 1.1. Характеристики «напряжение – время»: 1 – ОПН; 2 – сети

Характеристика «напряжение – время» сети определяется в основном значениями квазиустановившихся перенапряжений и их длительностями. Наибольшие квазиустановившиеся перенапряжения имеют место при несимметричных режимах, таких как одностороннее отключение несимметричного КЗ вследствие каскадного действия релейных защит; неполнофазного включения и отключения линии вследствие отказа фаз коммутируемого выключателя, в том числе и с учетом действия УРОВ. Большую опасность для ОПН представляют феррорезонансные перенапряжения, переходный феррорезонанс, чаще всего возникающий при неполнофазных коммутациях блочных и полублочных электропередач.

Расчеты квазиустановившихся перенапряжений необходимы в перечисленных ранее (разд. 1.2) случаях выбора ОПН повышенной энергоемкости. Кроме того, необходимо рассчитывать перенапряжения в распределительных устройствах 110÷750 кВ с элегазовой изоляцией и на подстанциях 110÷220 кВ с разземленными нейтралями силовых трансформаторов.

В остальных случаях можно обойтись без расчетов квазиустановившихся перенапряжений и осуществить выбор ОПН упрощенно, т е. минуя разд. 1.3.

Квазиустановившиеся перенапряжения, их амплитуда и длительность, определяющие выбор ограничителя, зависят от электрической схемы, в которой происходит коммутация, ее параметров, вида коммутации, места установки ОПН и т.п. Поэтому для рассматриваемой схемы электрической сети, подстанции и места установки ОПН производятся анализ возможных режимов работы РУ подстанции совместно с присоединенными линиями электропередач и расчет воздействующих на ОПН квазиустановившихся перенапряжений и их длительностей [1, 6, 8, 9].

После расчета квазиустановившихся перенапряжений из всех полученных значений амплитуд перенапряжений U_{yi} выбирается наи-

большая U_{y1} и соответствующее ей значение длительности перенапряжений t_{y1}. Из всех значений длительностей t_{yi} рассмотренных перенапряжений выбирается наибольшая t_{y2} и соответствующая ей амплитуда этого перенапряжения U_{y2}.

Эти значения сопоставляются с характеристикой «напряжение – время» выбранного ОПН $K_t = f(t)$ для случая с «предварительным нагружением энергией» – характеристика типа А. В зависимости от фирмы-изготовителя коэффициент $K_t = U_y/U_н$ или $K_t = U_y/U_{нро}$, где $U_н$ – номинальное напряжение ОПН. Эта характеристика представляется изготовителями в виде таблиц или графически в полулогарифмических координатах, как показано на рис. 1.2.

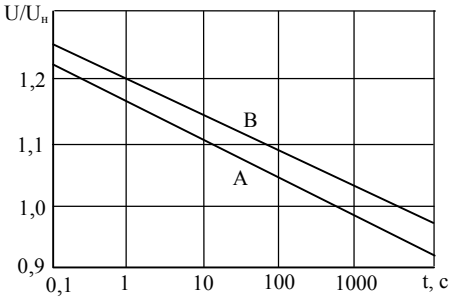


Рис. 1.2. Характеристики «напряжение – время» ОПН типа Exlim Q, выпускаемых ЗАО «АВВ УЭТМ»:
А – предварительное нагружение энергией 4,5 кДж/кВ$U_н$;
В – без предварительного нагружения

Для большинства выпускаемых типов ОПН в определенном интервале времени воздействия перенапряжений характеристика $K_t = f(t)$ может быть описана уравнением $K_t = a – b \cdot \lg t$. Значения коэффициентов a и b для разных типов ОПН и их производителей приведены в табл. П2.

По значениям t_{y1} и t_{y2} по характеристике $K_t = f(t)$ определяются значения K_{t1} и K_{t2}, по которым вычисляются значения номинального напряжения ОПН $U_н$ (или $U_{нро}$):

$$U_{н1} = U_{y1}/K_{t1} \quad \text{и} \quad U_{н2} = U_{y2}/K_{t2} .$$

Наибольшее из полученных значений, принимаемое в качестве расчетного, сравнивается с соответствующим значением напряжения предварительно выбранного ОПН. Если расчетное значение окажется больше соответствующего значения для ранее выбранного ОПН, то по номенклатуре ограничителей следует выбрать другой ОПН, у которого $U_н$ (или $U_{нро}$) имело бы значение больше расчетного.

После выбора типа ОПН устанавливается достаточность его параметров по условиям работы в квазиустановившихся режимах, для чего определяются нормируемые допустимые длительности $t_{нді}$ для всех действующих на данный ОПН квазиустановившихся перенапряжений. Значения $t_{нді}$ определяются исходя из значений $K_{ti} = U_{yi}/U_н$ (или

$K_{ti} = U_{yi}/U_{нро}$) [6] по зависимостям $K_t = f(t)$ типа А, если ОПН имеет энергоемкость не более 5 кДж/к$BU_н$, и по зависимостям типа В, если энергоемкость ОПН не менее 5 кДж/к$BU_н$. $U_н$ и $U_{нро}$ – характеристики выбранного типа ОПН. Рассчитанные значения $t_{нді}$ должны быть больше реальных длительностей соответствующих квазиустановившихся перенапряжений t_{yi}.

Если в течение 2÷3 часов подряд возможно несколько коммутаций и появлений квазиустановившихся перенапряжений, то производится пересчет временно допустимой длительности текущего воздействия перенапряжения с учетом всех предыдущих срабатываний ОПН от 1 до m, имевших место в течение этих 2÷3 часов, по формуле

$$t_{допі} = t_{нді}\left(1 - \sum_{1}^{m} \frac{t_{y(i-1)}}{t_{доп(i-1)}}\right),$$

где $t_{допі}$ – допустимое время текущего воздействия перенапряжения на ограничитель;

$t_{нді}$ – нормируемая допустимая длительность текущего воздействия, полученная по характеристике «напряжение – время»;

$t_{y(i-1)}$ – реальная длительность предыдущего воздействия перенапряжения;

$t_{доп(i-1)}$ – допустимая длительность предыдущего воздействия ($t_{доп1} = t_{вд1}$).

Значение номинального напряжения (или $U_{нро}$) выбранного типа ОПН считается удовлетворительным, если $t_{нді}$ или $t_{допі} > t_{yi}$.

1.4. Определение защитного уровня ОПН при коммутационных перенапряжениях

Остающееся напряжение на ОПН при расчетном токе коммутационных перенапряжений $U_{остк}$ должно быть не менее чем на 15÷20 % ниже испытательного напряжения коммутационным импульсом $U_{ки}$ защищаемого оборудования:

$$U_{остк} \le (0{,}8 \div 0{,}85) U_{ки} .$$

Испытательное напряжение коммутационным импульсом нормируется ГОСТ 1516.3-96 для электрооборудования 330 кВ и выше. Для оборудования низших классов напряжения нормируется одноминутное испытательное напряжение $U_{1мин}$. В этом случае уровень изоляции защищаемого трансформаторного оборудования может быть определен как

$$U_{ки} = K_и \cdot K_к \cdot U_{1мин} \sqrt{2} ,$$

где $К_и$ – коэффициент импульса при воздействии коммутационных перенапряжений; $К_к$ – коэффициент кумулятивности. Для трансформаторов и автотрансформаторов $К_и$=1,35, $К_к$=0,9; для аппаратов $К_и$=1,1, $К_к$=1. Значения одноминутных испытательных напряжений и коммутационных импульсов приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5. **Значения одноминутного испытательного напряжения и коммутационных импульсов для электрооборудования 110÷750 кВ**

Класс напряжения, кВ	**110**	**150**	**220**	**330**		**500**		**750**	
Уровень изоляции				а	б	а	б	а	б
Трансформаторы, шунтирующие реакторы	200	230	325	850	950	1050	1230	1425	1550/ 1675
Др. электрооборудование	200	275	396	850	950	1050	1230	1425	1550

Примечания: 1. Уровень изоляции: *а* – при применении для защиты ОПН; *б* – при применении для защиты вентильных разрядников. 2. Для $U_{ном}$=750 кВ в знаменателе указано значение для шунтирующих реакторов.

Расчетный ток коммутационных перенапряжений $I_{рк}$ зависит от вида и величины неограниченных перенапряжений. В зависимости от интенсивности переходных процессов и требуемой надежности защиты его значение принимается равным 500 или 1000 А. Если нет расчетных данных, можно принять $I_{рк}$=500 А для $U_{ном}$=110÷220 кВ и $I_{рк}$=1000 А для $U_{ном}$=330÷750 кВ.

Координационный интервал по коммутационным перенапряжениям, %,

$$\Delta U_к = \frac{U_{ки} - U_{остк}}{U_{ки}} 100 ,$$

где $U_{остк}$ – остающееся напряжение на ограничителе при расчетном токе коммутационных перенапряжений (500 А, 1000 А или 2000 А). Значение $\Delta U_к$ должно быть не менее 15÷20 %.

При необходимости статистической координации изоляции с 2 %–й вероятностью (для случаев трехфазного АПВ после неуспешного повторного включения, отключения асинхронного хода на конце длинной линии, передающей большие мощности) значение остающегося напряжения определяется из решения системы уравнений

$$U_{остк} = CI_р^{\alpha} ,$$

$$U_{остк} = U_к - К_{кн} Z I_р ,$$

где С – постоянная, определяемая по нормируемым значениям $I_{рн}$ и $U_{осткн}$,

$$C = \frac{U_{осткн}}{I_{рн}^{\alpha}} ;$$

$I_р$ – разрядный ток через ОПН;

$\alpha \cong 0{,}05$ – коэффициент нелинейности ОПН;

$U_к$ – неограниченное коммутационное перенапряжение в сети, принимаемое равным при отсутствии расчетов $3{,}5U_ф$ для воздушных линий;

$К_{кн}=1{,}2 \div 1{,}3$ – коэффициент несимметрии, учитывающий неодновременность срабатывания ОПН в разных фазах;

Z – волновое сопротивление линии по прямой последовательности.

Решение получают графоаналитическим образом. Строится вольтамперная характеристика ОПН $U_{остк} = CI_р^{\alpha}$ или часть ее в диапазоне токов выше и ниже $I_{рн}$ и напряжений в области $U_{остк н}$, затем строится прямая $U_{остк} = U_к - К_{кн} Z I_р$. Точка пересечения этих зависимостей дает значения $U_{остк}$ и $I_р$ при заданном $U_к$. Все расчеты выполняются в амплитудных значениях напряжения и тока.

1.5. Определение защитного уровня ОПН при грозовых перенапряжениях

Остающееся напряжение на ОПН при грозовых перенапряжениях $U_{остг}$ при токе координации 10(5) кА должно быть скоординировано с испытательным напряжением полной волной $U_{пги}$ защищаемого оборудования. Координационный интервал $\Delta U_г$ должен быть не менее 20 % и определяется по формуле

$$\Delta U_г = \frac{U_{пги} - U_{остг}}{U_{пги}} 100 \ \%,$$

где $U_{остг}$ – остающееся напряжение на ограничителе при токе координации (импульс 8/20 мкс).

Значения токов координации и испытательных напряжений полным импульсом приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6. **Значения испытательных напряжений полной волной (кВ) и токов координации (кА)**

Класс напряжения, кВ	**110**	**150**	**220**	**330**		**500**		**750**	
Уровень изоляции				а	б	а	б	а	б
Силовые трансформаторы	480	550	750	950	1050	1300	1550	1800	2100
Шунтирующие реакторы	480	550	750	1050	1175	1425	1675	1950	2250
Эл. магн. тр–ры напряжения	480	650	950	1050	1175	1425	1675	1950	2250
Тр–ры тока, аппараты	450	650	900	1050	1175	1425	1550	1950	2100
Ток координации	10	10	10	10÷15		20		20	

Примечание. Уровень изоляции: *а* – при применении для защиты ОПН; *б* – при применении для защиты вентильных разрядников.

Координация также считается выполненной, если расстояние между защищаемым оборудованием и ОПН не превышает допустимых значений. Правилами устройств электроустановок (ПУЭ) нормированы допустимые расстояния от вентильных разрядников (РВ) до защищаемого оборудования [2, табл. 4.2.10÷4.2.13]. Допустимые расстояния определяются до ближайшего РВ.

При использовании ОПН вместо РВ или при изменении испытательных напряжений защищаемого оборудования ПУЭ позволяют производить пересчет допустимого расстояния до силовых трансформаторов или другого электрооборудования по формуле

$$L_{опн} = L_{рв} \frac{U_{пги} - U_{опн}}{U_{пги} - U_{рв}},$$

где $L_{опн}$ – допустимое расстояние от ОПН до защищаемого трансформатора или другого оборудования;

$L_{рв}$ – допустимое расстояние от разрядника до защищаемого трансформатора или другого оборудования, нормируемое ПУЭ;

$U_{опн}$ и $U_{рв}$ – остающиеся напряжения соответственно на ОПН и РВ при токе 5 кА – для классов напряжения 110÷220 кВ, 10 кА – для классов напряжения 330 кВ и выше.

Вместе с тем есть мнение [7], что пересчет расстояний от защитного аппарата до наиболее удаленного оборудования РУ недопустим.

При большом числе присоединенных линий (более 7, 6, 4 линий соответственно на напряжении 110, 150, 220 кВ) ПУЭ допускают не ограничивать расстояние между защитным аппаратом и защищаемым оборудованием. В работе [7] рекомендуется ограничить расстояние от защитных аппаратов до максимально удаленного оборудования РУ при большом числе присоединенных ВЛ максимально допустимыми расстояниями, установленными ПУЭ при числе присоединенных ВЛ 6, 5, 3 соответственно для напряжений 110, 150, 220 кВ.

Для повышения надежности молниезащиты оборудования подстанций рекомендуется устанавливать ОПН на присоединенных ВЛ в непосредственной близости от РУ (например, на ближайшей опоре). Это необходимо делать и в случае повышенных (более 20 Ом) сопротивлений заземления опор на подходе к подстанции.

Установка ОПН на присоединенных к распределительному устройству воздушных линиях 500÷750 кВ (на подстанции или на ближайшей опоре) обязательна [7] по условиям защиты от коммутационных и грозовых перенапряжений.

1.6. Пример выбора ОПН

Схема ОРУ 330 – «треугольник»; автотрансформатор 330/110/10 кВ подключен к системе шин без выключателя. Разрядник типа РВМГ-330 установлен у автотрансформатора. Других разрядников на ОРУ 330 кВ нет. К ОРУ подходят две воздушные линии длиной 82 и 106 км.

Максимальные значения токов короткого замыкания на шинах подстанции: трехфазного КЗ 7350 А, однофазного КЗ 5820 А.

Наибольшее напряжение сети $U_{нс}$=341,6 кВ. IIСЗА. Данные, необходимые для расчета квазиустановившихся перенапряжений, имеются (здесь не приводятся).

Требуется выбрать ОПН для замены РВМГ-330.

• *Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения и энергоемкости ОПН.* Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН, применяемых в сетях с глухозаземленной нейтралью, должно быть взято с 5 %-м запасом по отношению к наибольшему рабочему фазному напряжению сети (табл. 1.1), если $U_{нрф} > U_{нс}$. В соответствии с табл. 1.2 принимаем $U_{нро}$=220 кВ.

В схеме ОРУ «треугольник» возможна неполнофазная коммутация линии с подключенным автотрансформатором, поэтому в этом случае рекомендуется [6] выбирать ограничитель с повышенной энергоемкостью (не ниже 4÷4,5 кДж/кВ$U_н$).

Предварительно выберем ограничитель типа PEXLIM P276 производства ЗАО «АВВ УЭТМ» с характеристиками, приведенными в табл. 1.7.

Таблица 1.7. **Характеристики PEXLIM P276**

$U_{нро}$, кВ	**$U_н$, кВ**	**I_{2000}, А**	**$I_{ср}$, А**	**$L_у$, см**	**$W_{опн}$, кДж**	**$U_{остк}$, при токах, А**			**$U_{ост}$, при I, кА**		**$U/U_н$=a–blgt**	
						500	1000	2000	10	20	a	b
221	276	1350	63	771,7	1932	539	558	572	628	688	1,116	0,06

Примечание. Уравнение $U/U_н$ = a–b·lgt справедливо для диапазона времени от 0,1 с до 10^4 с. Значения коэффициентов *a* и *b* приведены для характеристики с предварительным нагружением нормированным импульсом.

• *Проверка выбранного ОПН на соответствие характеристики «напряжение – время» квазиустановившимся перенапряжениям.* Анализ режима работы подстанции со стороны 330 кВ совместно с ВЛ 330 кВ и соседних подстанций показал возможность коммутации схемы *линия – автотрансформатор*. Расчетами, которые здесь не приведены, установлено, что определяющими выбор ОПН являются квазиустановившиеся перенапряжения, возникающие при отключении несимметричного КЗ и несимметричной коммутации блока *линия – ав-*

тотрансформатор, при которой выявлена возможность возникновения переходного феррорезонанса.

Расчетное значение квазиустановившегося перенапряжения при отключении несимметричного КЗ $U_{y1} = 1{,}35U_{нрф} = 283{,}5$ кВ. Длительность перенапряжения принята равной длительности ликвидации несимметричного КЗ с учетом действия первых и последних ступеней линейных и трансформаторных релейных защит $t_{y1} = 5$ с.

Расчетное значение квазиустановившегося перенапряжения при несимметричной коммутации блока *линия – автотрансформатор* $U_{y2} = 1{,}22U_{нрф} = 256{,}2$ кВ. Длительность перенапряжения $t_{y2} = 4$ с. При наличии переходного резонанса значение перенапряжения определяется путем добавления 0,3 к значению U_{y2} [6], т. е. $U_{y3} = (1{,}22 + 0{,}3)U_{нрф} = 319{,}2$ кВ. Это перенапряжение длится $t_{y3} = 0{,}5$ с, а затем снижается до значения U_{y2}.

По характеристике «напряжение – время» определяем расчетные значения номинальных напряжений ограничителя:

$\frac{U_{y1}}{U_{н1}} = 1{,}16 - 0{,}06\ell g5 = 1{,}118$, тогда $U_{н1}=U_{y1}/1{,}118=283{,}5/1{,}118=253{,}6$ кВ;

$\frac{U_{y2}}{U_{н2}} = 1{,}16 - 0{,}06\ell g4 = 1{,}124$, тогда $U_{н2}=U_{y2}/1{,}124=256{,}2/1{,}124=227{,}9$кВ;

$\frac{U_{y3}}{U_{н3}} = 1{,}16 - 0{,}06\ell g0{,}5 = 1{,}178$, тогда $U_{н3}=U_{y3}/1{,}178=319{,}2/1{,}178=271$ кВ.

Для выбранного ОПН $U_н=276$ кВ, что больше 271 кВ.

Проверим достаточность параметров выбранного ОПН по условиям работы в квазиустановившихся режимах, для чего определим нормируемые допустимые длительности $t_{нді}$ для действующих на данный ОПН квазиустановившихся перенапряжений. Значения $t_{нді}$ определяем исходя из значений $K_{ti} = U_{yi}/U_н$, по зависимости $K_t = f(t)$ типа В «без предварительного нагружения энергией», так как удельная энергоемкость ОПН составляет $W_{уопн} = W_{опн}/U_н = 1932/276 = 7$ кДж/кВ$U_н$, что более 5 кДж/кВ$U_н$.

$$K_t = f(t) = 1{,}194 - 0{,}056\lg t\ ;\ K_{t1} = U_{y1}/U_н = 283{,}5/276 = 1{,}027;$$

$$\lg t_{нд1} = \frac{1{,}194 - 1{,}027}{0{,}056} = 2{,}982\ ,\ t_{нд1} = 959{,}4\ \text{с}.$$

При определении временно допустимой длительности для перенапряжения U_{y3} необходимо иметь в виду, что это перенапряжение действует в течение 0,5 с, а затем снижается до значения U_{y2}, которое существует 3,5 с.

$$K_{t3} = U_{y3}/U_н = 319{,}2/276 = 1{,}157;$$

по характеристике $K_t = f(t)$ типа В определяем:

$$\lg t_{нд3} = \frac{1{,}194 - 1{,}157}{0{,}056} = 0{,}661, \quad t_{нд3} = 4{,}58 \text{ с}.$$

ОПН имеет запас по времени на следующую коммутацию, так как $t_{нд3} > t_{у3}$.

После первого воздействия значение квазиустановившегося перенапряжения снижается до $U_{у2}$=256,2 кВ, чему соответствует $K_{t2} = U_{у2}/U_н = 256{,}2/276 = 0{,}928$. Тогда по характеристике $K_t = f(t)$ типа В $t_{нд2} > 10000$ с (производитель дает характеристику $K_t = f(t)$ только до 10000 с). Примем $t_{нд2}$=10000 с. С учетом предыдущего воздействия допустимая длительность текущего воздействия будет более

$$t_{доп2} = t_{нд2}\left(1 - \frac{t_{у2} - t_{у3}}{t_{нд3}}\right) = 10000\left(1 - \frac{4 - 0{,}5}{4{,}58}\right) = 2358 \text{ с}.$$

Таким образом, допустимые длительности воздействий квазиустановившихся перенапряжений превышают соответствующие значения реальных длительностей и выбранный ограничитель эту проверку выдержал.

• *Определение защитного уровня ОПН при коммутационных перенапряжениях.* Остающееся напряжение на ОПН при расчетном токе коммутационных перенапряжений $U_{остк}$ должно быть не менее чем на 15÷20 % ниже испытательного напряжения коммутационным импульсом $U_{ки}$ защищаемого оборудования

$$U_{остк} \le (0{,}8 \div 0{,}85) U_{ки}.$$

Испытательное напряжение коммутационным импульсом нормируется ГОСТ 1516.3-96 для электрооборудования 330 кВ $U_{ки}$=850 кВ. Остающееся напряжение на ограничителе при расчетном токе коммутационных перенапряжений 1000 А $U_{остк}$=558 кВ.

$$\Delta U_к = \frac{U_{ки} - U_{остк}}{U_{ки}} 100 = \frac{850 - 558}{850} 100 = 34{,}3 \text{ %},$$

что более чем достаточно.

• *Определение защитного уровня ОПН при грозовых перенапряжениях.* Остающееся напряжение на ОПН при токе координации 10 кА $U_{остт}$=628 кВ должно быть скоординировано с испытательным напряжением полной волной для автотрансформатора $U_{пги}$=950 кВ и для другого оборудования $U_{пги}$=1050 кВ (табл. 1.6). Тогда координационный интервал для автотрансформатора

$$\Delta U_{г} = \frac{950 - 628}{950} 100 = 33{,}9\ \%,$$

для другого оборудования – 40,2 %, что больше допустимых 20 %.

Допустимое расстояние от ОПН до защищаемого автотрансформатора может быть оценено по формуле

$$L_{опн} = L_{рв} \frac{U_{пги} - U_{опн}}{U_{пги} - U_{рв}},$$

где $L_{рв}$ – допустимое расстояние от разрядника до защищаемого автотрансформатора, нормируемое ПУЭ;

$U_{опн}$ и $U_{рв}$ – остающиеся напряжения соответственно на ОПН и РВ при токе 10 кА.

Для вентильного разрядника РВМГ-330 $U_{рв}$=800 кВ при токе 10 кА. Тогда

$$L_{опн} = L_{рв} \frac{950 - 628}{950 - 800} = 2{,}15 L_{рв}.$$

Следовательно, ОПН может быть установлен на место, занимаемое вентильным разрядником, при этом надежность молниезащиты будет выше.

• *Проверка по взрывобезопасности и длине пути утечки.* Ток срабатывания противовзрывного устройства $I_{ср}$=63 кА превышает значение 40 кА, поэтому 10 %-й запас не требуется. Условие взрывобезопасности $I_{ср} > I_{макс\ кз} = 7{,}35$ кА выполняется.

Допустимая длина пути утечки для IIСЗА

$$L_{у} = 1{,}2 \lambda_{э} U_{ном} = 1{,}2 \cdot 1{,}5 \cdot 330 = 594 \text{ см}.$$

Длина пути утечки выбранного ОПН равна 771,7 см.

Таким образом, выбранный ограничитель соответствует условиям эксплуатации и может быть установлен вместо РВМГ-330.

2. Квазиустановившиеся перенапряжения и их расчет

Квазиустановившиеся перенапряжения – перенапряжения промышленной или близкой к ней частоты, а также перенапряжения на высших и низших гармониках, не затухающие или слабозатухающие, возникающие как следствие коммутации элементов сети и ликвидирующиеся действием релейной защиты или оперативного персонала.

Наибольший интерес представляют квазиустановившиеся перенапряжения резонансного типа, которые возникают только в односторонне питаемых электропередачах. Исключение составляет успешное ОАПВ.

Резонансные перенапряжения рассчитываются с учетом диапазона случайных колебаний реактивного сопротивления питающей системы и нелинейности характеристик намагничивания силовых трансформаторов, автотрансформаторов (АТР) и шунтирующих реакторов. В отличие от коммутационных и грозовых перенапряжений, защита от которых состоит в ограничении их амплитуды, защита от резонансных перенапряжений направлена на то, чтобы полностью исключить возможность возникновения резонансных явлений либо создать такие условия, при которых величина и длительность сопутствующих перенапряжений были бы безопасными для электрооборудования.

2.1. Расчет вынужденных напряжений переходного процесса перенапряжений частоты 50 Гц в симметричном режиме

Вынужденное напряжение переходного процесса перенапряжений – это напряжение частоты 50 Гц, которое устанавливается после затухания электромагнитных переходных процессов, вызванных какой-либо плановой или аварийной коммутацией, обычно через 0,03÷0,06 с после коммутации.

Значение этого напряжения зависит как от схемы электропередачи (длина и конструкция фазы линии; мощность питающей системы; наличие, число и расположение шунтирующих реакторов), так и от нелинейных характеристик контуров намагничивания силовых трансформаторов (АТР) питающей системы и промежуточных подстанций. Нелинейные характеристики ОПН и корона на проводах влияют слабо, и их учета не требуется. Случайный характер вынужденного напряжения определяется рядом факторов, связанных со схемой и режимом системы. Например: коммутации в различных точках питающей системы; включение и отключение шунтирующих реакторов и колебания ЭДС как в результате ведения графика электропередачи, так и дейст-

вия автоматических устройств регулирования возбуждения; плановых и аварийных ремонтов; случайности месторасположения КЗ на линии и т.п.

В табл. 2.1 приведены усредненные значения пределов случайных изменений ЭДС для электропередач, питающихся от шин станций, на генераторах которых имеется автоматическое регулирование возбуждения.

Таблица 2.1. **Усредненные значения пределов случайных изменений и среднего значения ЭДС**

Вид коммутации	**Системы возбуждения с неуправляемыми полупроводниковыми выпрямителями и электронная система возбуждения**			**Быстродействующие системы возбуждения с кратностью форсирования 2÷4**		
	$E_{мин}$	$E_{макс}$	$E_{ср}$	$E_{мин}$	$E_{макс}$	$E_{ср}$
Разрыв передачи вследствие отключения КЗ	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

Симметричный режим имеет место в результате плановых коммутаций включения линии, сброса нагрузки и аварийных коммутаций: успешного ТАПВ, отключения внешнего КЗ и разрыва передачи при асинхронном ходе.

Расчетная схема для определения вынужденного напряжения в симметричном и несимметричном (при однофазном КЗ) режимах при всех коммутациях, кроме успешного ОАПВ, для электропередач 110÷330 кВ показана на рис. 2.1,а, а для электропередач 500, 750 кВ – на рис. 2.1,б.

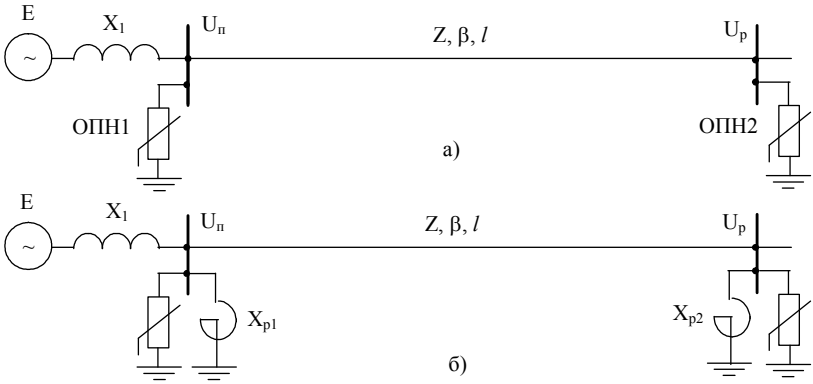


Рис. 2.1. Расчетные схемы для определения вынужденного напряжения:
l – длина линии, км; Z – волновое сопротивление, Ом; β – коэффициент изменения фазы, рад/км; $U_п$, $U_р$ – напряжения питающего и разомкнутого конца линии соответственно, кВ

Значения параметров электропередач для расчетов принимаются усредненными и выбираются из табл. 2.2 [1]. $X_1 = X`_d + X_{тр}$ или $X_1 = X_п + X_{тр}$, где $X`_d$ – переходное сопротивление генератора; $X_{тр}$ – реактивность трансформатора; $X_п$ – реактивность питающей системы.

Таблица 2.2. **Усредненные значения параметров электропередач**

U, кВ		110	220	330	500	750
Z, Ом		385	405	305	283	265
$Z^{(0)}$, Ом		845/875	785/820	645/675	560/590	485/560
$β/10^{-3}$, рад/км		1,0605	1,0704	1,0704	1,0755	1,0804
$β^{(0)}/10^{-3}$, рад/км		1,5464/ 1,5965	1,5022/ 1,6336	1,4902/ 1,5341	1,5924/ 1,6759	1,309/ 1,7681
$X_р$, Ом	**Схема без X_0**	–	–	–	1530	1880
	Схема с X_0	–	–	–	$1530 + 3X_0$	$1880 + 3X_0$
$R_р$, Ом		–	–	–	6,0	6,0

Примечание. Z и β – значения для прямой и обратной последовательностей; $Z^{(0)}$ и $β^{(0)}$ – значения для нулевой последовательности; в числителе – значения для линий со сплошными тросами, в знаменателе – для линий с разрезанными тросами; X_0 – реактивность реактора в нейтрали.

Для схемы на рис. 2.1,а вынужденное напряжение на разомкнутом конце линии в симметричном режиме

$$U_р = E\frac{\cos\varphi_1}{\cos(\lambda + \varphi_1)},$$

где $\lambda = \beta l$ – волновая длина линии по прямой последовательности;
φ_1 – волновая длина эквивалентной линии, замещающей X_1,

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{X_1}{Z}\right).$$

Вынужденное напряжение на питающем конце линии в симметричном режиме $U_п = U_р\cos\lambda$.

Для схемы на рис. 2.1,б

$$U_р = E\frac{\cos\varphi_р \cdot X_р}{\cos(\lambda+\varphi_р)\cdot(X_1+X_р)},$$

где $X_р = \dfrac{X_{р1}\cdot X_{р2}}{X_{р1}+X_{р2}}$; $\operatorname{tg}\varphi_р = \dfrac{X_{р1}\cdot X_{р2}\cdot X_1 - (X_{р1}+X_1)\cdot Z^2}{Z\cdot X_{р1}\cdot X_{р2}}$.

$$U_п = U_р\cos\lambda\,.$$

В течение года реактивность X_1 может меняться от минимального значения $X_{1мин}$ до максимального – $X_{1макс}$ так же, как и ЭДС от $E_{мин}$ до $E_{макс}$. Поэтому для известных значений $X_{1мин}$ и $X_{1макс}$, $E_{мин}$ и $E_{макс}$ определяются минимальные и максимальные значения $U_п$ и $U_р$. Если $U_{пмакс} \le 1{,}15$, то учета насыщения магнитопроводов не требуется. В противном случае влияние насыщения магнитопроводов на значения напряжений $U_п$ и $U_р$ следует учесть, для чего вычисляются значения безразмерных параметров η_1 и η_2 по следующим формулам:

– для схемы на рис. 2.1,а

$$\eta_1 = \frac{X_{1мин}\cos\varphi_1\cos\lambda}{Z_{баз}\cos(\lambda-\varphi_1)},\ \text{где}\ \ \varphi_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{X_{1мин}}{Z_{баз}}\right);$$

$$\eta_2 = \frac{X_{1макс}\cos\varphi_2\cos\lambda}{Z_{баз}\cos(\lambda-\varphi_2)},\ \text{где}\ \ \varphi_2 = \operatorname{arctg}\left(\frac{X_{1макс}}{Z_{баз}}\right);$$

– для схемы на рис. 2.1,б

$$\eta_1 = \frac{X_{рмин}\operatorname{tg}(\lambda+\varphi_1)}{X_{рмин}\operatorname{tg}\varphi_1 + Z_{баз}\operatorname{tg}(\lambda+\varphi_1)},$$

где $X_{рмин} = \dfrac{X_{р1}X_{1мин}}{X_{р1}+X_{1мин}}$; $\varphi_1 = \operatorname{arctg}\left(\dfrac{X_{рмин}}{Z_{баз}}\right)$;

$$\eta_2 = \frac{X_{рмакс}\operatorname{tg}(\lambda+\varphi_2)}{X_{рмакс}\operatorname{tg}\varphi_2 + Z_{баз}\operatorname{tg}(\lambda+\varphi_2)},$$

где $X_{рмакс} = \dfrac{X_{р1}X_{1макс}}{X_{р1}+X_{1макс}}$; $\varphi_2 = \operatorname{arctg}\left(\dfrac{X_{рмакс}}{Z_{баз}}\right)$.

Значение $Z_{баз}$ рассчитывается по формулам:

– для силовых трансформаторов, кОм,

$$Z_{баз} = \frac{U_н \sqrt{2}}{2{,}05 \cdot I_{хх} \sqrt{3}};$$

– для автотрансформаторов, кОм,

$$Z_{баз} = \frac{U_н \sqrt{2}}{1{,}65 \cdot I_{хх} \sqrt{3}},$$

где $U_н$ – номинальное напряжение трансформатора, кВ; $I_{хх}$ – паспортное значение тока холостого хода трансформатора, А.

По кривым (рис. 2.2 или рис. 2.3) в соответствии с рассчитанными значениями η_1 и η_2, а также минимальным и максимальным значениями напряжения на питающем конце линии, рассчитанными без учета насыщения, определяются минимальное и максимальное напряжения на питающем конце линии с учетом насыщения – $U_{пнмин}$ и $U_{пнмакс}$. Соответственно на разомкнутом конце линии

$$U_{рнмин} = U_{пнмин} / \cos\lambda;\ U_{рнмакс} = U_{пнмакс} / \cos\lambda.$$

Математическое ожидание вынужденного напряжения на разомкнутом конце линии и дисперсия равны

$$\overline{U}_р = \frac{U_{рмин} \cdot U_{рмакс}}{U_{рмакс} - U_{рмин}} \ell n \frac{U_{рмакс}}{U_{рмин}};$$

$$\sigma^2_{up} = U_{рмин} \frac{U_{рмакс}}{U_{рмакс} - U_{рмин}} \cdot$$

$$\cdot \left[(U_{рмакс} - U_{рмин}) \left(1 + \frac{\overline{U}^2_р}{U_{рмин} U_{рмакс}} - 2\overline{U}_р \ell n \frac{U_{рмакс}}{U_{рмин}} \right) \right].$$

Вероятность того, что в симметричном режиме напряжение на разомкнутом конце линии не превзойдет своего максимального значения ($U_{рмакс}$) в годовом интервале случайных изменений $U_р$, равна

$$P_u = \frac{U_{рмин} \cdot (U_{рмакс} - \overline{U}_р)}{(U_{рмакс} - U_{рмин}) \cdot \overline{U}_р}.$$

По данной методике рассчитываются вынужденные значения напряжений при соответствующих значениях Е (табл. 2.1) в следующих режимах: плановое включение линии; успешное ТАПВ; разрыв передачи вследствие асинхронного хода.

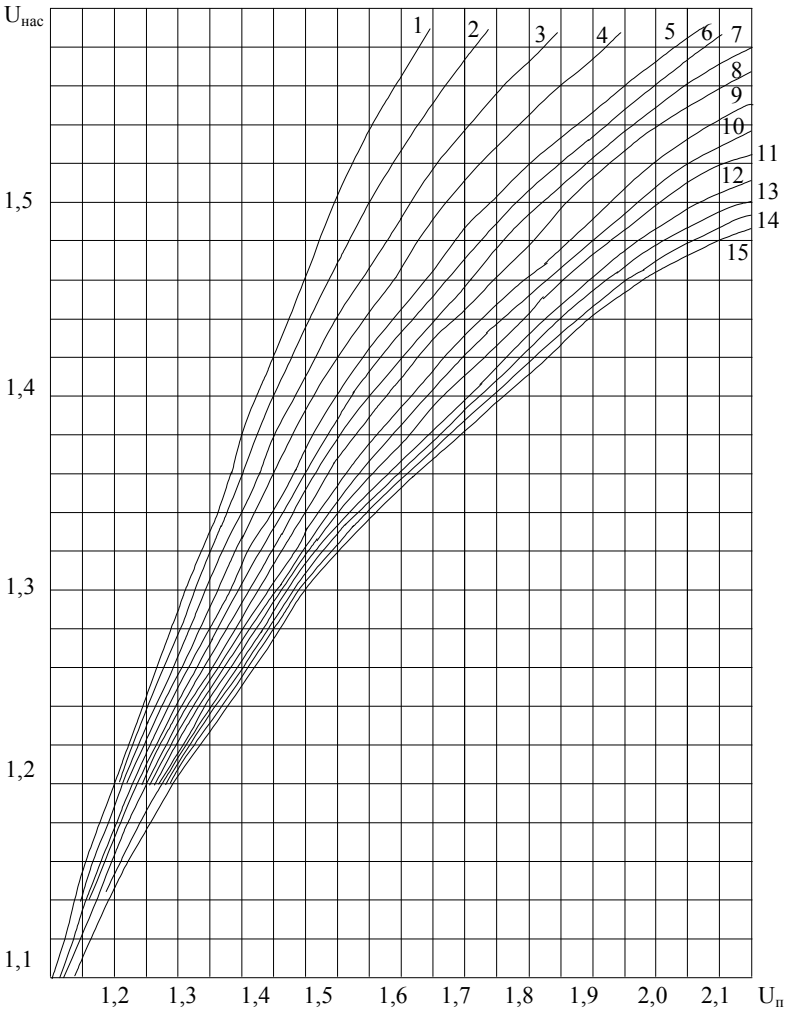


Рис. 2.2. Зависимость напряжения на питающем конце линии $U_{пн}$ с учетом насыщения магнитопровода силового автотрансформатора от напряжения $U_п$ без учета насыщения для разных значений коэффициента η:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\eta/10^{-3}$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30

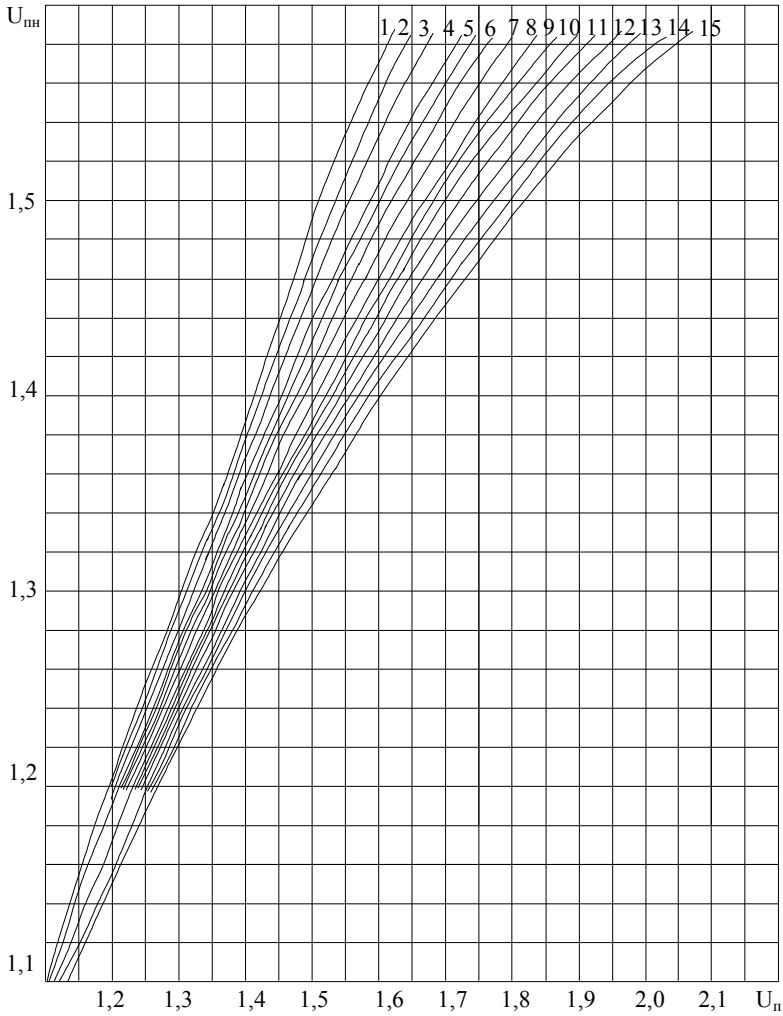


Рис. 2.3. Зависимость напряжения на питающем конце линии $U_{пн}$ с учетом насыщения магнитопровода силового трансформатора от $U_п$ без учета насыщения для разных значений коэффициента η:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\eta/10^{-3}$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30

2.2. Расчет вынужденных напряжений частоты 50 Гц в несимметричном режиме при однополюсном коротком замыкании

Этот режим имеет место в результате таких аварийных коммутаций, как трехфазный разрыв электропередачи вследствие ликвидации несимметричного короткого замыкания (КЗ), неуспешное ТАПВ. Вынужденное напряжение вычисляется через коэффициент несимметрии $h_к$ по формуле $U_к = Uh_к$. Оно может изменяться в течение года от минимального $U_{кмин}$ до максимального $U_{кмакс}$ значения. Статистический характер этой величины определяется как факторами, приводящими как к случайным изменениям напряжения электропередачи U, так и случайным месторасположением вдоль линии точки КЗ. Максимальное и минимальное значения вынужденного напряжения при ненасыщенных магнитопроводах трансформаторов соответственно на разомкнутом и питающем концах линии определяются по формулам:

$$U_{ркмакс} = E_{кмакс} U_{рмакс}\, h_{макс};\ U_{пкмакс} = E_{кмакс} U_{пмакс}\, h_{макс};$$

$$U_{ркмин} = E_{кмин} U_{рмин}\, h_{мин};\ U_{пкмин} = E_{кмин} U_{пмин}\, h_{мин},$$

где $E_{кмакс}$, $E_{кмин}$ – максимальное и минимальное значения ЭДС для соответствующего вида несимметричного режима (таб. 2.1); $U_{рмакс}$, $U_{рмин}$, $U_{пмакс}$, $U_{пмин}$ – определяются по методике разд. 2.1 для случая планового включения линии; $h_{макс}$ – максимальное из значений коэффициента несимметрии, рассчитанных для КЗ в начале и конце линии по максимальным реактивностям системы; $h_{мин}$ – минимальное из значений коэффициента несимметрии, вычисленных для КЗ в начале и конце линии по минимальным реактивностям системы.

Значение h_k рассчитывается по формуле

$$h_к = \sqrt{1 + \varepsilon[\nu_0 - 1 + \varepsilon(1-\nu_0)^2]},$$

где $\varepsilon = \dfrac{1}{1+\nu_0+\nu_2}$.

Значение $\nu_к$ определяется в зависимости от того, в каком месте произошло КЗ – в начале или в конце линии. При КЗ на конце линии или вблизи него $\nu_к$ рассчитывается по следующим формулам.

Для схемы на рис. 2.1,а

$$\nu_0 = \frac{X_1^{(0)} \cos\lambda^{(0)} + Z^{(0)} \sin\lambda^{(0)}}{X_1 \cos\lambda + Z \sin\lambda},$$

где $X_1^{(0)}$ – реактивность питающей системы по нулевой последовательности; $Z^{(0)}$ – волновое сопротивление линии по нулевой последовательности; $\lambda^{(0)}=\beta^{(0)}l$ – волновая длина линии по нулевой последовательности.

Если параметры электропередачи по прямой и обратной последовательностям имеют одинаковые значения, то $\nu_1=\nu_2=1$. Если значения разные, то $\nu_1=1$, а ν_2 определяется по формуле

$$\nu_2 = \frac{X_1^{(2)}\cos\lambda^{(2)} + Z^{(2)}\sin\lambda^{(2)}}{X_1\cos\lambda + Z\sin\lambda},$$

где индекс в скобках (2) обозначает параметр схемы электропередачи по обратной последовательности. Отсутствие цифры в верхней части букв указывает, что этот параметр относится к прямой последовательности.

Для схемы на рис. 2.1,б

$$\nu_0 = \frac{X^{(0)}\cos\lambda^{(0)} + Z^{(0)}\sin\lambda^{(0)}}{X\cos\lambda + Z\sin\lambda},$$

где $X^{(0)} = \dfrac{X_1^{(0)}\cdot X_{pl}^{(0)}}{X_1^{(0)} + X_{pl}^{(0)}}$, $X = \dfrac{X_1\cdot X_{pl}}{X_1 + X_{pl}}$.

Если параметры электропередачи по прямой и обратной последовательностям имеют одинаковые значения, то $\nu_1=\nu_2=1$. Если значения разные, то $\nu_1=1$, а ν_2 определяется по формуле

$$\nu_2 = \frac{X^{(2)}\cos\lambda^{(2)} + Z^{(2)}\sin\lambda^{(2)}}{X\cos\lambda + Z\sin\lambda},$$

где $X^{(2)} = \dfrac{X_1^{(2)}\cdot X_{pl}^{(2)}}{X_1^{(2)} + X_{pl}^{(2)}}$.

При КЗ в начале линии или вблизи него ν_k рассчитывается по следующим формулам:

– для схемы на рис. 2.1,а $\quad \nu_0 = \dfrac{X_1^{(0)}}{X_1};\ \nu_1 = 1;\ \nu_2 = \dfrac{X_1^{(2)}}{X_1};$

– для схемы на рис. 2.1,б $\quad \nu_0 = \dfrac{X^{(0)}}{X};\ \nu_1 = 1;\ \nu_2 = \dfrac{X^{(2)}}{X}.$

Если $U_{пмакс} > 1{,}15$, то для окончательного определения значений вынужденных напряжений необходимо учесть насыщение магнитопроводов трансформаторов (или автотрансформаторов) так, как это описано в разд. 2.1.

Математическое ожидание

$$\overline{U}_k = \frac{U_{кнмин} U_{кнмакс}}{U_{кнмакс} - U_{кнмин}} \ell n \frac{U_{кнмакс}}{U_{кнмин}}.$$

Индекс «н» указывает, что значения вынужденных напряжений подставляются в формулу с учетом насыщения.

2.3. Расчет вынужденных напряжений частоты 50 Гц в несимметричном режиме при успешном ОАПВ

2.3.1. Методика расчета

Цикл успешного ОАПВ состоит из трех последовательных коммутаций: КЗ на землю одной из фаз, заканчивающееся двусторонним отключением аварийной фазы; автоматическое включение аварийной фазы после бестоковой паузы длительностью $t_{ОАПВ}$ одним из двух линейных выключателей; полное включение аварийной фазы вторым выключателем.

Вынужденное напряжение при успешном ОАПВ – это напряжение, устанавливающееся в промежутке времени между окончанием бестоковой паузы и моментом замыкания фазы в транзит вторым линейным выключателем. Математическое ожидание, дисперсия и функция распределения значений данного напряжения определяются теми же факторами, что и распределение симметричного вынужденного напряжения, но учета влияния нелинейности характеристик намагничивания не требуется.

Защита от перенапряжений в паузе успешного ОАПВ необходима, если на рассматриваемой электропередаче восстанавливающееся напряжение $U_в$ на выключателе аварийной фазы превышает допустимое значение для ОПН при длительности $t_{ОАПВ}$. Возможно применить одну из следующих мер защиты:

– отключение на время $t_{ОАПВ}$ хотя бы одного из шунтирующих реакторов, что приводит к расстройству резонанса и уменьшению восстанавливающегося напряжения до значения $(1 \div 1{,}1)U_ф$;

– использование схемы четырехлучевого реактора, когда звезда шунтирующих реакторов $L_р$ заземляется через нулевой реактор $L_о$, при этом значение восстанавливающегося напряжения не превышает фазного значения.

На рис. 2.4,а представлена расчетная схема электропередач 220, 330 кВ для определения вынужденного напряжения при успешном ОАПВ, а на рис. 2.4,б – расчетная схема электропередач 500, 750 кВ.

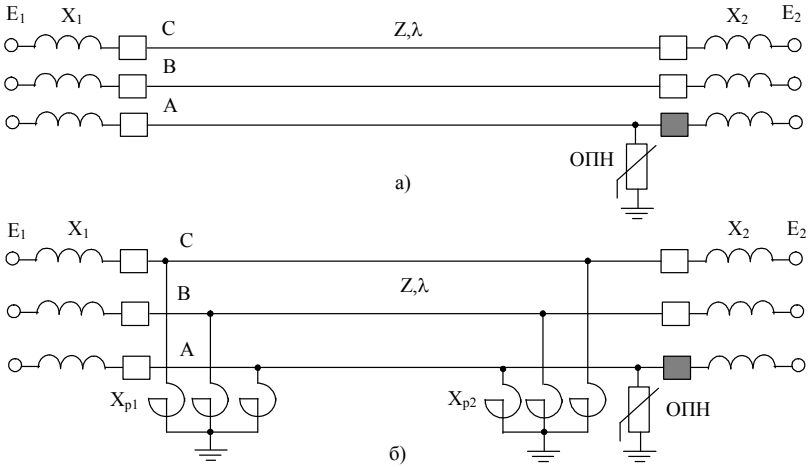


Рис. 2.4. Расчетные схемы для определения вынужденного напряжения в коммутации успешного ОАПВ

Расчет вынужденного напряжения производится по формуле

$$U_a = \sqrt{q^2U_2^2 + (1-q)^2E_2^2 + 2q(1-q)U_2E_2\cos\theta},$$

где $q = 1 - \dfrac{1}{1+m}\left(\dfrac{1}{1+n_1} - \dfrac{m}{1+n_o}\right)$.

Для электропередач 220 и 330 кВ (рис. 2.4,а) параметры m и n_i определяются по параметрам нулевой и прямой последовательностей соответственно

$$m = \frac{X_2^{(0)} + Z^{(0)}tg(\lambda^{(0)} + \varphi^{(0)})}{X_2 + Ztg(\lambda + \varphi)};$$

$$n_1 = \frac{X_2}{Z}ctg(\lambda + \varphi), \text{ где } \varphi = arctg\left(\frac{X_1}{Z}\right);$$

$$n_0 = \frac{X_2^{(0)}}{Z^{(0)}}ctg(\lambda^{(0)} + \varphi^{(0)}), \text{ где } \varphi^{(0)} = arctg\left(\frac{X_1^{(0)}}{Z^{(0)}}\right).$$

Угол θ между ЭДС E_1 и E_2 вычисляется по формуле

$$\theta = \pm 5{,}7 + [1 + (0{,}14 \div 0{,}17)t_{оапв}]\arcsin\left(\frac{PU_н^2}{P_{нат}U_2E_2}\frac{X_2\cos(\lambda+\varphi) + Z\sin(\lambda+\varphi)}{Z\cos\lambda}\right),$$

где $U_н$ – номинальное напряжение электропередачи, в относительных единицах $U_н=1$; $U_2 = U_1/\cos\lambda$, а значение U_1 рассчитывается по формулам определения напряжения в начале разомкнутой линии для случая планового включения линии (разд. 2.1). Усредненные значения отношения передаваемой мощности к натуральной ($P/P_{нат}$) приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3. **Усредненные значения $P/P_{нат}$**

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

Для электропередач 500 и 750 кВ (рис. 2.4,б) параметры n_i, m и θ рассчитываются по следующим формулам:

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

где $X = \dfrac{X_1X_{p1}}{X_1+X_{p1}}$; $\varphi_p = \operatorname{arctg}\left(\dfrac{Z^2 - X_1X_p}{Z(X_1+X_p)}\right)$; $X_p = \dfrac{X_{p1}X_{p2}}{X_{p1}+X_{p2}}$;

$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\dfrac{X_1}{Z}\right)$;

$$n_0 = \frac{X_2^{(0)}\cos\varphi^{(0)}\cos(\lambda^{(0)}-\varphi_p^{(0)})}{X^{(0)}\cos\varphi_p^{(0)}\cos(\lambda^{(0)}-\varphi^{(0)})},$$

где $\varphi_p^{(0)} = \operatorname{arctg}\left(\dfrac{(Z^{(0)})^2 - X_1^{(0)}X_p}{Z^{(0)}(X_1^{(0)}+X_p)}\right)$; $X = \dfrac{X_1^{(0)}X_{p1}}{X_1^{(0)}+X_{p1}}$;

$\varphi^{(0)} = \operatorname{arctg}\left(\dfrac{X_1^{(0)}}{Z^{(0)}}\right)$; $m = \dfrac{X_2^{(0)}n_1(1+n_o)}{X_2n_o(1-n_1)}$;

$$\theta \cong \pm 5{,}7 + [1 + (0{,}14 \div 0{,}17)t_{оапв}]\arcsin\left[\frac{PU_н^2(X_1+X_p)}{P_{нат}U_pE_2ZX_p}\left(\frac{X\cos\varphi_p\cos(\lambda-\varphi)}{\cos\varphi\cos(\lambda-\varphi_p)} + X_2\right)\right].$$

Угол θ вычисляется по параметрам прямой последовательности.

Значения X_1 и X_2, E_1 и E_2 в течение года изменяются в пределах от минимального значения до максимального. Для определения статистических характеристик вынужденных напряжений рассчитываются:

для системы с минимальной реактивностью $X_{мин}$ значения q_1 и θ_1, а для работы системы с $X_{макс}$ значения q_2 и θ_2. Значения θ_1 и θ_2 определяются по параметрам, рассчитанным для $X_{мин}$ и $X_{макс}$ соответственно. Причем в случае $X_{мин}$ в формулах определения угла θ цифра 5,7 имеет знак «+», а из диапазона (0,14÷0,17) выбирается цифра 0,17; в случае $X_{макс}$ цифра 5,7 имеет знак «–», а из диапазона (0,14÷0,17) выбирается цифра 0,14. Например, формула определения угла θ для схемы на рис. 2.4,а в случае $X_{мин}$ будет выглядеть так:

$$\theta_1 \cong [(5,7+1,17)t_{оапв}]\arcsin\left[\frac{PU_н^2(X_{1МИН}+X_р)}{P_{нат}U_р E_{2МИН} Z X_р}\left(\frac{X_{МИН}\cos\varphi_{рМИН}\cos(\lambda-\varphi)}{\cos\varphi\cos(\lambda-\varphi_{рМИН})}+X_2\right)\right].$$

Минимальное $U_{амин}$ и максимальное $U_{амакс}$ значения вынужденного напряжения при успешном ОАПВ, которые могут быть в течение года, определяются по формулам:

$$U_{амин}=\sqrt{q_1^2U_{2мин}^2+(1-q_1)^2E_{2мин}^2+2q_1(1-q_1)U_{2мин}E_{2мин}\cos\theta_1};$$

$$U_{амакс}=\sqrt{q_2^2U_{2макс}^2+(1-q_2)^2E_{2макс}^2+2q_2(1-q_2)U_{2макс}E_{2макс}\cos\theta_2}.$$

Математическое ожидание вынужденного напряжения частоты 50 Гц в несимметричном режиме при успешном ОАПВ вычисляется по формуле

$$\overline{U}_а=\frac{U_{амин}U_{амакс}}{U_{амакс}-U_{амин}}\ln\frac{U_{амакс}}{U_{амин}}.$$

2.3.2. Пример расчета вынужденных напряжений в режиме успешного ОАПВ

Рассчитать вынужденное напряжение в режиме успешного ОАПВ в электропередаче 220 кВ, расчетная схема которой представлена на рис. 2.5.

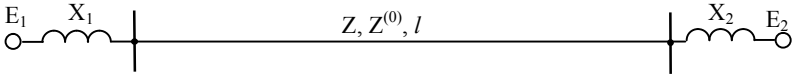


Рис. 2.5. Расчетная схема

Параметры схемы:

$X_{1макс}$=32 Ом, $X_{1макс}^{(0)}=34$ Ом, $X_{1мин}$=26 Ом, $X_{1мин}^{(0)}=30$ Ом,

$X_{2макс}$=22 Ом, $X_{2макс}^{(0)}=20$ Ом, $X_{2мин}$=16 Ом, $X_{2мин}^{(0)}=17$ Ом,

l=90 км, Z=405 Ом, $Z^{(0)}$=785 Ом, $\beta=1{,}0704\cdot10^{-3}$ рад/км, $\beta^{(0)}=1{,}5022\cdot10^{-3}$ рад/км, $\lambda=\beta l=0{,}096$ рад, $\lambda^{(0)}=\beta^{(0)}l=0{,}135$ рад.
$E_{1мин}=E_{2мин}=1$, $E_{1макс}=E_{2макс}=1{,}15$. $t_{оапв}=2$ с.

Расчет

• *Определение вспомогательных параметров n, q, θ для максимальных реактивностей систем:*

$$\varphi_2=\operatorname{arctg}\left(\frac{X_{1макс}}{Z}\right)=0{,}079\text{ рад};\qquad n_1=\frac{X_{2макс}\operatorname{ctg}(\lambda+\varphi_2)}{Z}=0{,}35;$$

$$\varphi_{o2}=\operatorname{arctg}\left(\frac{X^{(0)}_{1макс}}{Z^{(0)}}\right)=0{,}043\text{ рад};\qquad n_o=\frac{X^{(0)}_{2макс}\operatorname{ctg}\left(\lambda^{(0)}+\varphi^{(0)}_2\right)}{Z^{(0)}}=0{,}141;$$

$$m=\frac{X^{(0)}_{2макс}+Z^{(0)}\operatorname{tg}\left(\lambda^{(0)}+\varphi^{(0)}_2\right)}{X_{2макс}+Z\operatorname{tg}(\lambda+\varphi_2)}=1{,}725;$$

$$q_2=1-\frac{1}{1+m}\left(\frac{1}{1+n_1}-\frac{m}{1+n_o}\right)=1{,}283;\quad U_{p2}=E_{1макс}\frac{\cos\varphi_2}{\cos(\lambda+\varphi_2)}=1{,}164.$$

Для электропередач 220 кВ $P/P_{нат}=0{,}65$, $U_н=1$.

$$\theta_2=-5{,}7+(1+0{,}14t_{оапв})\arcsin\left(\frac{PU^2_н}{P_{нат}U_{p2}E_{2макс}}\frac{X_{2макс}\cos(\lambda+\varphi_2)+Z\sin(\lambda+\varphi_2)}{Z\cos\lambda}\right)=$$

$$=18{,}648^{o}.$$

• *Определение вспомогательных параметров n, q, θ для минимальных реактивностей систем:*

$$\varphi_1=\operatorname{arctg}\left(\frac{X_{1мин}}{Z}\right)=0{,}064\text{ рад};\qquad n_1=\frac{X_{2мин}\operatorname{ctg}(\lambda+\varphi_1)}{Z}=0{,}244;$$

$$\varphi^{(0)}_1=\operatorname{arctg}\left(\frac{X^{(0)}_{1мин}}{Z^{(0)}}\right)=0{,}038\text{ рад};\qquad n_o=\frac{X^{(0)}_{2мин}\operatorname{ctg}\left(\lambda^{(0)}+\varphi^{(0)}_1\right)}{Z^{(0)}}=0{,}124;$$

$$m=\frac{X^{(0)}_{2мин}+Z^{(0)}\operatorname{tg}\left(\lambda^{(0)}+\varphi^{(0)}_1\right)}{X_{2мин}+Z\operatorname{tg}(\lambda+\varphi_1)}=1{,}895;$$

$$q_1=1-\frac{1}{1+m}\left(\frac{1}{1+n_1}-\frac{m}{1+n_o}\right)=1{,}305;\quad U_{p1}=E_{1мин}\frac{\cos\varphi_1}{\cos(\lambda+\varphi_1)}=1{,}011.$$

$$\theta_1 = 5{,}7 + (1 + 0{,}17 t_{оапв}) \arcsin\left(\frac{P U_н^2}{P_{нат} U_{p1} E_{2мин}} \frac{X_{2мин} \cos(\lambda + \varphi_1) + Z \sin(\lambda + \varphi_1)}{Z \cos\lambda} \right) =$$

$= 39{,}098^{o}$.

Минимальное $U_{1оапв}$ и максимальное $U_{2оапв}$ значения вынужденного напряжения при успешном ОАПВ

$$U_{1оапв} = \sqrt{q_1^2 U_{p1}^2 + (1 - q_1)^2 E_{2мин}^2 + 2 q_1 (1 - q_1) U_{p1} E_{2мин} \cos\theta_1} = 1{,}099 ,$$

$$U_{2оапв} = \sqrt{q_2^2 U_{p2}^2 + (1 - q_2)^2 E_{2макс}^2 + 2 q_2 (1 - q_2) U_{p2} E_{2макс} \cos\theta_2} = 1{,}19 .$$

2.4. Расчет квазиустановившихся перенапряжений при неполнофазных режимах

2.4.1. Методика расчета

Неполнофазные режимы наблюдаются при отказе во включении или отключении одной или двух фаз коммутируемого выключателя. Вероятность отказа двух фаз крайне мала, и такой режим обычно не учитывается.

Перенапряжения, возникающие в неполнофазных режимах, могут иметь место только в блочных или полублочных электропередачах, односторонне питаемых от трехобмоточных трансформаторов или АТР, третичная обмотка которых замкнута в треугольник. Перенапряжения возможны, если безразмерный параметр М отрицателен [1]. При двухстороннем питании, отсутствии или разомкнутом треугольнике третичной обмотки перенапряжения в неполнофазных режимах невозможны (М > 0).

Безразмерный параметр М рассчитывается по формуле

$$M = \frac{(1 + \dot{Y}^{(0)} \dot{Z}^{(0)}) \dot{Y}}{(1 + \dot{Y}\dot{Z}) \dot{Y}^{(0)}} .$$

Кратность перенапряжений относительно земли на недовключенной (или недоотключенной) фазе без учета потерь

$$K_б = \frac{E}{1 + 2M} \left(1 - M + \dot{Y}^{(0)} \frac{\dot{Z}^{(0)} - \dot{Z}}{1 + \dot{Z}\dot{Y}} \right).$$

Значения величин, входящих в формулы расчета М и $K_б$, рассчитываются в зависимости от номера схемы на рис. 2.6 и параметров электропередачи по следующим формулам:

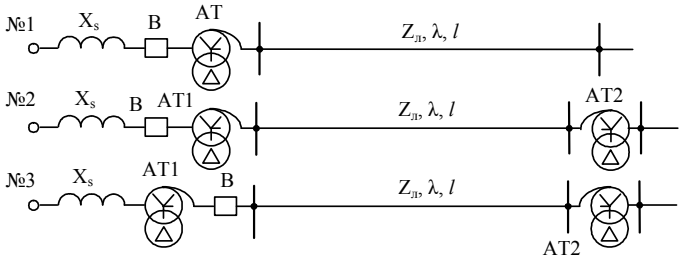


Рис. 2.6. Однолинейные расчетные схемы блочных электропередач

Для схемы №1: неполнофазная коммутация выключателем В (рис. 2.6) блока *автотрансформатор – линия*:

$$\dot{Z} = jX_s; \quad \dot{Z}^{(0)} = jX_s^{(0)},$$

где X_s, $X_s^{(0)}$ – реактивности питающей системы по прямой и нулевой последовательностям;

$$\dot{y} = \frac{\dot{y}_{вх}}{1 + \dot{y}_{вх} jX_{вс}},$$

где $\dot{y}_{вх} = j\frac{tg\lambda}{Z_л}$; $X_{вс}$ – реактивность рассеяния между обмотками высокого и среднего напряжения автотрансформатора АТ.

$$\dot{y}^{(0)} = \frac{1 + \dot{y}_{вх}^{(0)} jX_{вн}}{jX_{сн} - \dot{y}_{вх}^{(0)}(X_в X_н + X_в X_с + X_с X_н)},$$

где $\dot{y}_{вх}^{(0)} = j\frac{tg\lambda^{(0)}}{Z_л^{(0)}}$; $X_{вн}$, $X_{сн}$ – реактивности рассеяния между обмотками высокого и низкого, среднего и низкого напряжения автотрансформатора соответственно; $X_в$, $X_н$, $X_с$ – реактивности обмоток высокого, низкого и среднего напряжения автотрансформатора соответственно.

Для схемы №2: неполнофазная коммутация выключателем В (рис. 2.6) блока *автотрансформатор – линия – автотрансформатор*:

$$\dot{Z} = jX_s; \quad \dot{Z}^{(0)} = jX_s^{(0)}; \quad \dot{y} = \frac{\dot{y}_{вх}}{1 + \dot{y}_{вх} jX_{вс1}}, \text{ где } \dot{y}_{вх} = j\frac{tg\lambda}{Z_л};$$

$X_{вс1}$ − реактивность рассеяния между обмотками высокого и среднего напряжения автотрансформатора АТ1.

$$\dot{y}^{(0)} = \frac{1 + \dot{y}_{вх}^{(0)} jX_{вн1}}{jX_{сн1} - \dot{y}_{вх}^{(0)}(X_{в1} X_{н1} + X_{в1} X_{с1} + X_{с1} X_{н1})},$$

где $X_{вн1}$, $X_{сн1}$ – реактивности рассеяния между обмотками высокого и низкого, среднего и низкого напряжения автотрансформатора АТ1 соответственно; $X_{в1}$, $X_{н1}$, $X_{с1}$ – реактивности обмоток высокого, низкого и среднего напряжения автотрансформатора АТ1 соответственно.

$$\dot{y}_{вх}^{(0)} = -j\frac{Z_{л}^{(0)} - X_{вн2}tg\lambda^{(0)}}{Z_{л}^{(0)}(X_{вн2} + Z_{л}^{(0)}tg\lambda^{(0)})},$$

где $X_{вн2}$ – реактивность рассеяния между обмотками высокого и низкого напряжения автотрансформатора АТ2.

Для схемы №3: неполнофазная коммутация выключателем В (рис. 2.6) блока *линия – автотрансформатор*:

$$\dot{Z} = j(X_s + X_{вс1}); \quad \dot{Z}^{(0)} = jX_{в1} + j\frac{X_{н1}(X_s^{(0)} + X_{с1})}{X_s^{(0)} + X_{сн1}}; \quad \dot{y} = j\frac{tg\lambda}{Z_{л}};$$

$$\dot{y}^{(0)} = -j\frac{Z_{л}^{(0)} - X_{вн2}tg\lambda^{(0)}}{Z_{л}^{(0)}(X_{вн2} + Z_{л}^{(0)}tg\lambda^{(0)})}.$$

Величина перенапряжений ограничивается активными потерями и насыщением стальных сердечников трансформаторов (АТР), однако при параметрах электропередач, близких к точке резонанса, их значение может достигать $(1{,}8 \div 2{,}1)U_ф$.

Кратность перенапряжений, ограниченная потерями на корону, вычисляется по формуле

$$K = \frac{K_б}{1 + \Delta_к},$$

где $\Delta_к$ – коэффициент, учитывающий снижение короной кратности перенапряжений, определяемый по зависимостям (рис. 2.7) для разных значений М и напряжения начала общей короны на проводах – $U_к$ [1, 10].

Кривые (рис. 2.7) соответствуют следующим значениям коэффициента М и напряжения начала общей короны на проводах $U_к$:

1 – $0 \geq M \geq -0{,}5$; $1{,}2U_ф \leq U_к \leq 1{,}4U_ф$;
2 – $0 \geq M \geq -0{,}5$; $1{,}0U_ф \leq U_к \leq 1{,}2U_ф$;
3 – $M < -0{,}5$; $1{,}2U_ф \leq U_к \leq 1{,}4U_ф$;
4 – $M < -0{,}5$; $1{,}0U_ф \leq U_к \leq 1{,}2U_ф$.

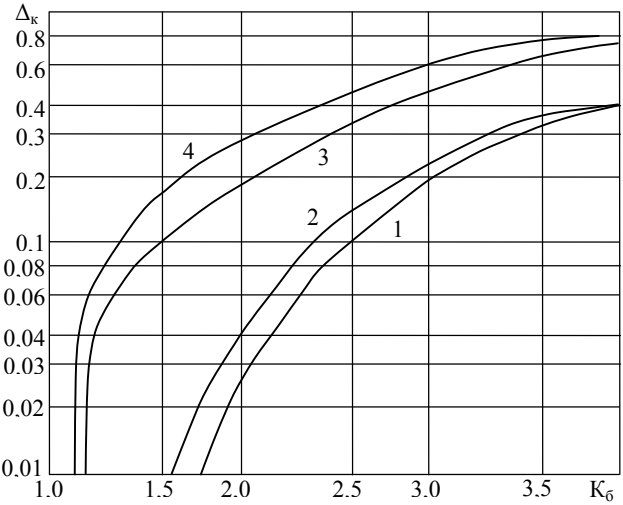


Рис. 2.7. Зависимости для определения поправочного коэффициента $\Delta_к$

Реактивности рассеяния между обмотками автотрансформатора или трансформатора соответственно высокого–среднего, высокого–низкого и среднего–низкого напряжения ($X_{вс}$, $X_{вн}$, $X_{сн}$) определяются по формулам, Ом:

$$X_{вс} = \frac{U_{квс}U_н^2}{100P_н}; \quad X_{вн} = \frac{U_{квн}U_н^2}{100P_н}; \quad X_{сн} = \frac{U_{ксн}U_н^2}{100P_н},$$

где $U_к$ – паспортные значения напряжения короткого замыкания для соответствующих обмоток, %;

$U_н$ – номинальное напряжение трансформатора, кВ;

$P_н$–номинальная мощность трансформатора, МВА.

Реактивности $X_в$, $X_с$, $X_н$ трехлучевой схемы замещения трансформатора рассчитываются по формулам, Ом:

$$X_в = 0{,}5(X_{вн} + X_{вс} - X_{сн}); \; X_с = 0{,}5(X_{вс} + X_{сн} - X_{вн}); \; X_н = 0{,}5(X_{сн} + X_{вн} - X_{вс}).$$

2.4.2. Пример расчета перенапряжений при неполнофазной коммутации блока автотрансформатор – линия

Параметры электропередачи: схема электропередачи соответствует схеме №1 (рис. 2.6); номинальное напряжение $U_{ном}$= 220 кВ; длина линии *l*=70 км; волновое сопротивление линии по прямой последова-

тельности $Z_л$=405 Ом; волновое сопротивление линии по нулевой последовательности $Z_л^{(0)} = 785$ Ом; коэффициенты изменения фазы: по прямой последовательности $\beta=1{,}0704\cdot10^{-3}$ рад/км, по нулевой последовательности $\beta^{(0)}=1{,}5022\cdot10^{-3}$ рад/км; реактивности питающей системы: по прямой последовательности X_S=20 Ом, по нулевой последовательности $X_S^{(0)} = 14$ Ом; напряжение начала общей короны $U_к=1{,}25U_ф$; автотрансформатор типа АТДЦТН–63000/220/110–78У1.

Параметры автотрансформатора: номинальная мощность $P_н$=63 МВА; напряжения короткого замыкания $U_{квс}$=11%, $U_{ксн}$=21%, $U_{квн}$=34%.

• *Расчет перенапряжений при неполнофазной коммутации выключателем В (рис. 2.6) блока автотрансформатор – линия.*

Реактивности автотрансформатора:

$$X_{вс} = \frac{U_{квс}\,U_н^2}{100\cdot P_н} = \frac{11\cdot220^2}{100\cdot63} = 84{,}5\,\text{Ом};$$

$$X_{вн} = \frac{34\cdot220^2}{100\cdot63} = 261{,}2\,\text{Ом};\quad X_{сн} = \frac{21\cdot220^2}{100\cdot63} = j161{,}3\,\text{Ом};$$

$$X_в = 0{,}5(X_{вн} + X_{вс} - X_{сн}) = 0{,}5(261{,}2 + 84{,}5 - 161{,}3) = 92{,}2\,\text{Ом};$$

$$X_с = 0{,}5(X_{вс} + X_{сн} - X_{вн}) = -7{,}68\,\text{Ом};$$

$$X_н = 0{,}5(X_{сн} + X_{вн} - X_{вс}) = 169\,\text{Ом}.$$

Расчетные параметры электропередачи:

$$\dot{Z} = jX_S = j20\,\text{Ом};\quad \dot{Z}^{(0)} = jX_S^{(0)} = j14\,\text{Ом};$$

$\lambda=\beta l=0{,}075$ рад; $\lambda^{(0)}=\beta^{(0)}l=0{,}105$ рад;

$$\dot{У}_{вх} = j\frac{tg\lambda}{Z_л} = j\frac{tg0{,}075}{405} = j1{,}854\cdot10^{-4}\ \text{Ом}^{-1};$$

$$\dot{У} = \frac{\dot{У}_{вх}}{1+\dot{У}_{вх}jX_{вс}} = \frac{j1{,}854\cdot10^{-4}}{1+j1{,}854\cdot10^{-4}\,j84{,}5} = j1{,}883\cdot10^{-4}\ \text{Ом}^{-1};$$

$$\dot{У}_{вх}^{(0)} = j\frac{tg\lambda^{(0)}}{Z_л^{(0)}} = j\frac{tg0{,}105}{785} = j1{,}345\cdot10^{-4}\ \text{Ом}^{-1};$$

$$\dot{У}^{(0)} = \frac{1 + \dot{У}_{вх}^{(0)} jX_{вн}}{jX_{сн} - \dot{У}_{вх}^{(0)}(X_в X_н + X_в X_с + X_с X_н)} =$$

$$= \frac{1 + j1{,}345 \cdot 10^{-4}\, j261{,}2}{j161{,}3 - j1{,}345 \cdot 10^{-4}[92{,}2 \cdot 169 + 92{,}2 \cdot (-7{,}68) + (-7{,}68) \cdot 169]} =$$

$$= -j5{,}914 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}.$$

Определение безразмерного параметра М

$$M = \frac{(1 + \dot{У}^{(0)}\dot{Z}^{(0)})\dot{У}}{(1 + \dot{У}\dot{Z})\dot{У}^{(0)}} = \frac{(1 - j5{,}914 \cdot 10^{-3} \cdot j14)\, j1{,}883 \cdot 10^{-4}}{(1 + j1{,}883 \cdot 10^{-4} \cdot j20)(-j5{,}914 \cdot 10^{-3})} = -0{,}035 .$$

Параметр М отрицателен, следовательно, перенапряжения при данной коммутации возможны.

Кратность перенапряжений без учета короны при Е=1

$$К_б = \frac{E}{1 + 2M}\left(1 - M + \dot{У}^{(0)}\frac{\dot{Z}^{(0)} + \dot{Z}}{1 + \dot{Z}\dot{У}}\right) = 1{,}328 .$$

В рассматриваемом примере $0 \geq M \geq -0{,}5$; $1{,}2U_ф \leq U_к \leq 1{,}4U_ф$, следовательно, поправку на корону надо определять по кривой 1 (рис. 2.7). Однако по этой кривой нельзя определить значение $\Delta_к$ для $К_б$=1,328, так как при данной кратности перенапряжений влияние короны пренебрежимо мало. Таким образом, окончательное значение кратности перенапряжений составит 1,328 по отношению к наибольшему рабочему фазному напряжению.

2.4.3. Пример расчета перенапряжений при неполнофазной коммутации блока линия – автотрансформатор

Рассчитать кратность перенапряжений, возникающих при неполнофазной коммутации блока *линия – автотрансформатор* (рис. 2.7).

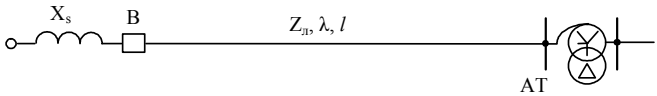


Рис. 2.7. Расчетная схема электропередачи

Параметры электропередачи и автотрансформатора такие же, как в разд. 2.4.2.

Расчет

Расчет кратности перенапряжений выполняется по формулам разд. 2.4.1 для схемы №3 (рис. 2.6).

Расчетные параметры электропередачи:

$\dot{Z} = jX_s = j20$ Ом; $\dot{Z}^{(0)} = jX_s^{(0)} = j14$ Ом;

$\lambda=\beta l=0{,}075$ рад; $\lambda^{(0)}=\beta^{(0)}l=0{,}105$ рад;

$$\dot{У} = j\frac{tg\lambda}{Z_л} = j\frac{tg0{,}075}{405} = j1{,}854\cdot10^{-4}\ \text{Ом}^{-1};$$

$$\dot{У}^{(0)} = -j\frac{Z_л^{(0)} - X_{вн}tg\lambda^{(0)}}{Z_л^{(0)}(X_{вн} + Z_л^{(0)}tg\lambda^{(0)})} = -j\frac{785 - 261{,}2\cdot tg0{,}105}{785(261{,}2 + 785\cdot tg0{,}105)} =$$

$$= -j2{,}779\cdot10^{-3}\ \text{Ом}^{-1}.$$

Безразмерный параметр М

$$M = \frac{(1+\dot{У}^{(0)}\dot{Z}^{(0)})\dot{У}}{(1+\dot{У}\dot{Z})\dot{У}^{(0)}} = \frac{(1-j2{,}779\cdot10^{-3}\cdot j14)j1{,}854\cdot10^{-4}}{(1+j1{,}854\cdot10^{-4}\cdot j20)(-j2{,}779\cdot10^{-3})} = -0{,}07.$$

Параметр М отрицателен, следовательно, перенапряжения при данной коммутации возможны.

Кратность перенапряжений без учета короны при Е=1

$$K_б = \frac{E}{1+2M}\left(1 - M + \dot{У}^{(0)}\frac{\dot{Z}^{(0)} + \dot{Z}}{1+\dot{Z}\dot{У}}\right) = 1{,}353.$$

Как и в предыдущем примере, поправку на корону учитывать не надо по тем же причинам.

2.5. Переходный феррорезонанс и определение возможности его возникновения

2.5.1. Переходный феррорезонанс и частотные характеристики электропередачи

Переходный феррорезонанс возможен только в односторонне питаемых блочных или полублочных передачах, где ВЛ коммутируется вместе с невозбужденным или недовозбужденным силовым трансформатором. Такие коммутации имеют место при плановом включении, ТАПВ, отключении внешнего КЗ, а также при подключении к линии невозбужденного трансформатора.

Переходный феррорезонанс может возникнуть и на линиях с односторонним питанием, секционированных выключателями на участки с тупиковыми подстанциями на отпайках (рис. 2.8). Это может произойти в ремонтных или послеаварийных режимах, при ТАПВ головного участка секционированной передачи, если она одноцепная (рис. 2.9).

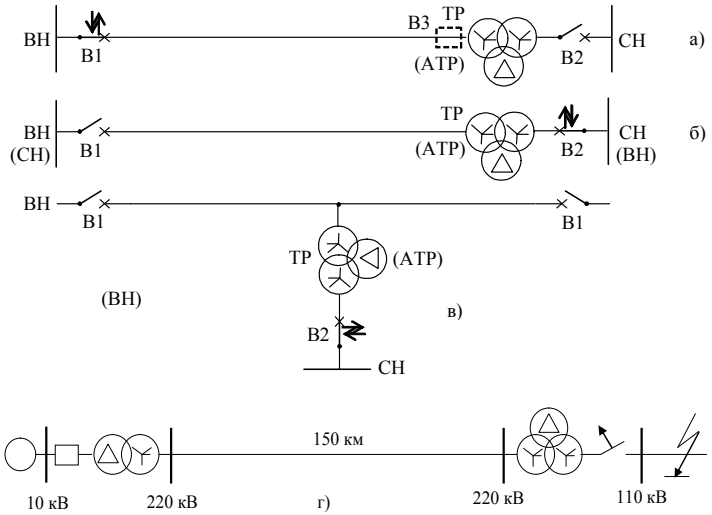


Рис. 2.8. Схемы, в которых возможен переходный феррорезонанс

Физическая природа этого вида перенапряжений следующая. В любой из перечисленных коммутаций в магнитной цепи трансформатора начинается переходный 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 апериодическая составляющая $\psi_o(t)$. Наличие в потокосцеплении апериодической составляющей приводит к появлению в токе намагничивания кроме основной как нечетных, так и четных составляющих, которые будут существовать, пока апериодическая составляющая не затухнет.

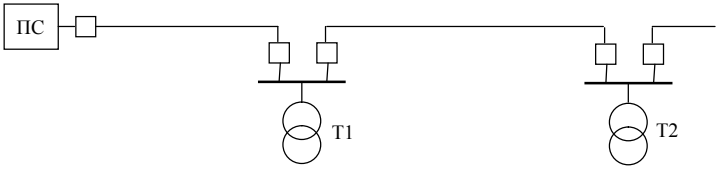


Рис. 2.9. Секционированная электропередача

Гармонические составляющие тока намагничивания вызывают на элементах цепи падения напряжения, что по своему действию эквивалентно введению в систему продольных ЭДС соответствующей частоты. Поэтому, если одна или несколько частот свободных колебаний электропередачи, коммутируемой в блоке с невозбужденным транс-

форматором, близка к частоте какой-либо гармонической составляющей 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 апериодическая составляющая потокосцепления.

Величина и время существования перенапряжений при явлениях переходного феррорезонанса зависят от значения первой собственной частоты электропередачи 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 высокого напряжения трансформатора, играют второстепенную роль.

Условием появления переходного феррорезонанса на 2–й и 3–й гармониках, в том числе и в неполнофазных схемах, является близость расчетной частоты свободных колебаний в схеме прямой последовательности к двойной или тройной от промышленной частоты. Переходный феррорезонанс возникнет, если будут выполняться следующие условия:

– для второй гармоники $1{,}6\omega < \omega_{св} < 2{,}2\omega$;

– для третьей гармоники $2{,}4\omega < \omega_{св} < 3{,}3\omega$,

где $\omega_{св}$ – частота свободных колебаний электропередачи; $\omega = 314$ с$^{-1}$.

Частота свободных колебаний определяется по уравнениям частотных характеристик электропередачи $Z_э = Z+2Z^{(0)}$ при $Z_э = 0$, т.е. в точке пересечения частотной характеристики с нулевой осью абсцисс.

Наиболее опасным воздействием на ОПН является возникновение переходного феррорезонанса при неполнофазной коммутации разомкнутых блочных электропередач. В этом случае повышение напряжения, вызванное переходным феррорезонансом, накладывается на квазиустановившиеся перенапряжения, обусловленные неполнофазной коммутацией электропередачи.

Частотная характеристика для электропередачи за №1 на рис. 2.6

$$Z_э = Z_1 + 2Z^{(0)},$$

где сопротивление электропередачи по прямой последовательности

$$Z_1 = X_s \cdot \omega^* + X_{вс} \cdot \omega^* - Z_л \cdot \mathrm{ctg}(\lambda \cdot \omega^*)$$

(ω^* – частота свободных колебаний электропередачи в относительных величинах, т. е. по отношению к промышленной частоте).

Сопротивление электропередачи по нулевой последовательности

$$Z^{(0)} = X_s^{(0)}\omega^* + X_c\omega^* + \frac{\left(X_в\omega^* - Z_л^{(0)}\mathrm{ctg}(\lambda^{(0)}\omega^*)\right)X_н\omega^*}{X_в\omega^* + X_н\omega^* - Z_л^{(0)}\mathrm{ctg}(\lambda^{(0)}\omega^*)}.$$

Частотная характеристика для электропередачи за №3 на рис. 2.6

$$Z_э = Z_1 + 2Z^{(0)},$$

где сопротивление электропередачи по прямой последовательности

$$Z_1 = X_s \cdot \omega^* - Z_л \cdot ctg(\lambda \cdot \omega^*);$$

сопротивление электропередачи по нулевой последовательности

$$Z^{(0)} = X_s^{(0)} \cdot \omega^* + Z_л^{(0)} tg((\lambda^{(0)} + \lambda_э)\omega^*)$$

$$(\lambda_э = arc\,tg\left(\frac{X_{вн}}{Z_л^{(0)}}\right)).$$

Повышение напряжения при переходном феррорезонансе учитывается путем прибавления 0,3 [6] к кратности квазиустановившихся перенапряжений, обусловленных неполнофазной коммутацией и вызвавшей переходный феррорезонанс. Время существования такого режима принимается равным 0,3 с, 0,5 с и 0,7÷0,8 с соответственно для линий 110÷150, 220÷330 и 500÷750 кВ.

Если кратность перенапряжений при переходном феррорезонансе окажется опасной для высоковольтного оборудования электропередачи, то необходимо принять следующие меры:

– эксплуатационными инструкциями запретить как коммутации линии в блоке с невозбужденным трансформатором (АТР), так и подключение к линии невозбужденного трансформатора или АТР. При необходимости подобных коммутаций трансформатор (или АТР) 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 АТР, коммутируемого в блоке с ВЛ, 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 – активное и реактивное сопротивления реактора.

2.5.2. Пример расчета частотной характеристики и определения резонансной частоты блочной электропередачи автотрансформатор – линия

Требуется рассчитать частотную характеристику и определить резонансную частоту для электропередачи, рассмотренной в примере

2.4.2; сделать вывод о возможности возникновения переходного феррорезонанса.

Для данной схемы электропередачи (схема №1, рис. 2.6) расчет частотной характеристики выполняется по следующим формулам.

Частотная характеристика $Z_э = Z_1 + 2Z^{(0)}$.

Сопротивление электропередачи по прямой последовательности

$$Z_1 = X_s \cdot \omega^* + X_{вс} \cdot \omega^* - Z_л \cdot \mathrm{ctg}(\lambda \cdot \omega^*).$$

Сопротивление электропередачи по нулевой последовательности

$$Z^{(0)} = X_s^{(0)}\omega^* + X_c\omega^* + \frac{\left(X_в\omega^* - Z_л^{(0)}\mathrm{ctg}(\lambda^{(0)}\omega^*)\right)X_н\omega^*}{X_в\omega^* + X_н\omega^* - Z_л^{(0)}\mathrm{ctg}(\lambda^{(0)}\omega^*)}.$$

Результаты расчета по этим формулам приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4. **Параметры частотной характеристики электропередачи**

ω^*	2	2,5	3,059	3,06	3,5	4
$Z^{(0)}$, Ом	386,9	517,2	708,1	708,5	925,7	1345
Z_1, Ом	–2473	–1875	–1416	–1416	–1143	–892,6
$Z_э$, Ом	–1700	–841,1	–0,098	1,393	708,4	1797

Как видно из табл. 2.4, в рассматриваемой электропередаче резонансная частота $\omega_{св} \approx 3$. Точное значение резонансной частоты находится в промежутке между 3,059 и 3,06 при $Z_э$=0.

Таким образом, при неполнофазной коммутации блока *автотрансформатор – линия* с параметрами, указанными в примере 2.2, возможно возникновение переходного феррорезонанса на третьей гармонике. При этом возникнет перенапряжение с кратностью $K_{пер} = K_б + 0{,}3 = 1{,}328 + 0{,}3 = 1{,}628$ и длительностью 0,5 с.

2.5.3. Пример расчета частотной характеристики и определения резонансной частоты блочной электропередачи линия – автотрансформатор

Требуется рассчитать частотную характеристику и определить резонансную частоту для электропередачи, рассмотренной в примере 2.4.3; сделать вывод о возможности возникновения переходного феррорезонанса.

Для данной схемы электропередачи (схема №3, рис. 2.6) расчет частотной характеристики выполняется по следующим формулам:

частотная характеристика $Z_э = Z_1 + 2Z^{(0)}$;

сопротивление электропередачи по прямой последовательности

$$Z_1 = X_s \cdot \omega^* - Z_л \cdot \mathrm{ctg}(\lambda \cdot \omega^*);$$

сопротивление электропередачи по нулевой последовательности

$$Z^{(0)} = X_S^{(0)} \cdot \omega^* + Z_л^{(0)} \operatorname{tg}((\lambda^{(0)} + \lambda_э)\omega^*), \text{ где } \lambda_э = \operatorname{arc\,tg}\left(\frac{X_{вн}}{Z_л^{(0)}}\right).$$

Результаты расчета по этим формулам приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5. **Параметры частотной характеристики электропередачи**

ω^*	1,5	2	2,273	2,274	3	3,5
$Z^{(0)}$, Ом	606,8	919,4	1155	1156	2435	6659
Z_1, Ом	–3558	–2642	–2310	–2308	–1711	–1439
$Z_э$, Ом	–2345	–803,6	–0,467	2,587	3158	11880

Как видно из табл. 2.5, в рассматриваемой электропередаче резонансная частота $\omega_{св} \approx 2{,}273$. Точное значение резонансной частоты находится в промежутке между 2,273 и 2,274 при $Z_э$=0.

Таким образом, при неполнофазной коммутации блока *автотрансформатор – линия* с параметрами, указанными в примере разд. 2.3, возможно возникновение переходного феррорезонанса на второй гармонике. При этом возникнет перенапряжение с кратностью $К_{пер} = К_б + 0{,}3 = 1{,}353 + 0{,}3 = 1{,}653$ и длительностью 0,5 с.

3. Расчет ожидаемого срока службы нелинейных ограничителей перенапряжений 110÷750 кВ

3.1. Исходные положения

Расчет ожидаемого срока службы ОПН состоит в проверке надежности его работы при ограничении коммутационных перенапряжений в условиях конкретной электропередачи. Надежность ОПН является достаточной, если ожидаемый с доверительной вероятностью $P_{дов}$ срок службы ОПН $N_{сл}$ (ожидаемое число лет безаварийной работы) будет не менее нормируемого [4]. Нормированные значения срока службы ОПН приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. **Нормируемый срок службы ОПН при доверительной вероятности $P_{дов}$=0,98**

$U_{ном}$, кВ	110	220	330	500	750
$N_{сл}$, лет	25	25	25	30	30

Методика расчета состоит из следующих этапов:

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

Оценка надежности ограничителей, установленных на питающем и на разомкнутом концах электропередачи (см. рис. 2.1), должна производиться раздельно, так как токовые нагрузки на них существенно отличаются.

В симметричном режиме амплитуда неограниченных перенапряжений К в относительных единицах (о.е.) определяется по формуле

$$K = K_{уд}U,$$

где $K_{уд}$ – ударный коэффициент; U – амплитуда вынужденной составляющей перенапряжений.

Ударный коэффициент характеризует вид коммутации и интенсивность переходного процесса, а вынужденная составляющая – схему и режим электропередачи.

Для каждого вида коммутации как в симметричном, так и в несимметричном режимах математическое ожидание $\overline{k}$, среднеквадратичное отклонение $\sigma_к$ амплитуды неограниченных перенапряжений определяются по формулам:

$$\overline{k} = \overline{K}_{уд}\overline{U}\ ;\ \sigma_к = \sqrt{\overline{K}_{уд}^2\sigma_u^2 + \overline{U}^2\sigma_y^2}\ ,$$

где $\overline{K}_{уд}$ и $\sigma_у$ – математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение ударного коэффициента для соответствующей коммутации; $\overline{U}$ и σ_u – то же самое для вынужденной составляющей перенапряжений.

Если наименьшая из частот собственных колебаний коммутируемой электропередачи $\omega_c \geq 1{,}6\omega$, что характерно для большинства электропередач, то ударный коэффициент перенапряжений, возникающих на разомкнутом конце, $K_{удр}$ статистически инвариантен относительно структуры и параметров этой передачи. В этом случае закон статистических распределений $K_{удр}$ определяется только видом коммутации, а параметры этого закона $\overline{K}_{удр}$ и $\sigma_{ур}$ одинаковы для любой электропередачи независимо от ее сложности и класса номинального напряжения.

Ударный коэффициент перенапряжений, возникающих на питающем конце электропередачи, $K_{удп}$ подчиняется тому же закону, что и ударный коэффициент перенапряжений на разомкнутом конце, однако значения его другие, т. е. $K_{удп} \neq K_{удр}$ и $\sigma_{уп} \neq \sigma_{ур}$.

На рис. 3.1 представлены зависимости $\overline{K}_{удп} / \overline{K}_{удр}$ и $\sigma_{уп}/\sigma_{ур}$ от безразмерного параметра d, значение которого зависит от параметров электропередачи и определяется по формуле

$$d = \frac{X_п}{tg\lambda},$$

где $X_п = X_1$ – для схемы электропередачи без шунтирующих реакторов (см. рис. 2.1,а),

$$X_п = \frac{X_1}{1+\frac{Z}{X_{р2}}\left(1+\frac{X_1}{Z}\right)+\frac{Z\cdot X_1}{X_{р2}}\left(\frac{1}{Z}+\frac{1}{X_{р2}}\right)}$$ – для схемы с реакторами (см. рис. 2.1,б);

(X_1 – сопротивление предвключенной индуктивности на промышленной частоте; Z – волновое сопротивление линии);

λ – волновая длина линии.

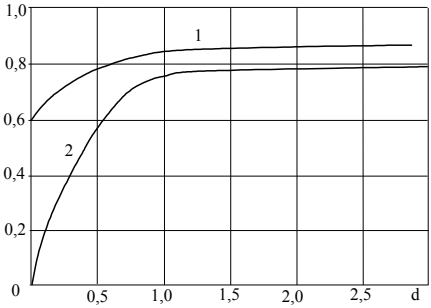


Рис. 3.1. Зависимости отношений:

$1 - \overline{K}_{удп} / \overline{K}_{удр} = f(d)$; $2 - \sigma_{уп}/\sigma_{ур}=f(d)$

Для расчетов в системе относительных единиц применяются в качестве базисных значения параметров электропередачи, приведенные в табл. 3.2.

Таблица 3.2. **Базисные значения параметров электропередачи**

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

Вольтамперная характеристика ОПН при коммутационных перенапряжениях

$$U = A\cdot I^{\alpha} = A\cdot I^{0,04}.$$

3.2. Статистические распределения неограниченных перенапряжений в точке установки ОПН

Виды коммутаций и ожидаемое число воздействий перенапряжений, возникающих при коммутациях, на резистор одной фазы ОПН за год представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. **Ожидаемое число воздействий на резистор фазы ОПН за год**

S	**Вид коммутации**	**$U_{ном}$, кВ**				
		110	**220**	**330**	**500**	**750**
1	Плановое включение ненагруженной линии	5÷8	5÷8	3÷6	3÷6	1÷3
2	Успешное ТАПВ	$2{,}3\cdot 10^{-2}\cdot l$	$6{,}1\cdot 10^{-2}\cdot l$	$5{,}1\cdot 10^{-4}\cdot l$	$2{,}6\cdot 10^{-4}\cdot l$	$2{,}4\cdot 10^{-4}\cdot l$
3	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	Трехфазный разрыв электропередачи вследствие ликвидации несимметричного КЗ	$3{,}3\cdot10^{-2}\cdot l$	$10^{-2}\cdot l$	$2{,}7\cdot10^{-2}\cdot l$	$6{,}5\cdot10^{-3}\cdot l$	$10^{-3}\cdot l$
5	Неуспешное ТАПВ	$4{,}4\cdot10^{-2}\cdot l$	$2{,}2\cdot10^{-2}\cdot l$	$7{,}0\cdot10^{-3}\cdot l$	$6{,}8\cdot10^{-3}\cdot l$	$1{,}2\cdot10^{-4}\cdot l$
6	Включение ненагруженной блочной электропередачи	5÷8	5÷8	4÷5	-	-
7	Успешное ОАПВ	-	$2{,}3\cdot10^{-3}\cdot l$	$2{,}3\cdot10^{-3}\cdot l$	$1{,}5\cdot10^{-3}\cdot l$	$1{,}2\cdot10^{-3}\cdot l$
8	Отключение масляными выключателями ненагруженной линии с КЗ фазой	3÷5	3÷5	-	-	-
9	Разрыв передачи после неуспешного ОАПВ	-	-	$9{,}1\cdot10^{-3}\cdot l$	$1{,}4\cdot10^{-2}\cdot l$	$6{,}1\cdot10^{-3}\cdot l$

Примечание. l – длина линии, км; S – номер коммутации.

Численные значения математического ожидания $\overline{K}_{удр}$ и среднеквадратичного отклонения $\sigma_{ур}$ для коммутационных перенапряжений, ударные коэффициенты которых не зависят от времени, приведены в табл. 3.4.

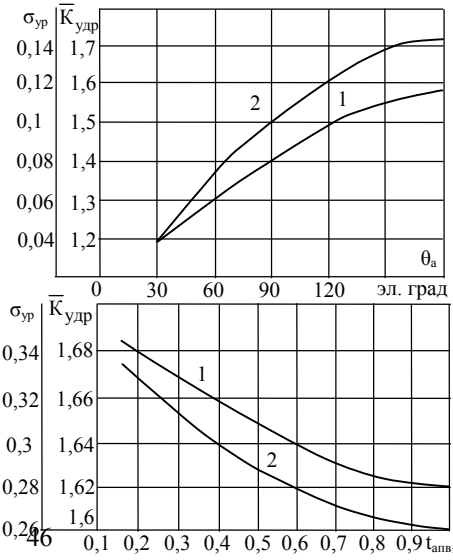
Таблица 3.4. **Значения ударных коэффициентов $\overline{K}_{удр}$ и среднеквадратичных отклонений $\sigma_{ур}$**

S	**1**	**3**	**4**	**6**	**7**	**8**	**9**
$\overline{K}_{удр}$	1,61	1,53	1,34	1,39	1,55	2,04	1,4
$\sigma_{ур}$	0,183	0,175	0,132	0,197	0,15	0,352	0,126

Значения, приведенные в табл. 3.4, получены в результате экспериментов, выполненных в действующих энергосистемах [1].

Для электропередач, оборудованных автоматикой прекращения асинхронного хода (АПАХ), значения $\overline{K}_{удр}$ и $\sigma_{уд}$ (коммутация S3) определяются в зависимости от значения уставки θ_a по рис. 3.2.

В коммутациях успешного (S2) и неуспешного (S5) ТАПВ значения ударных коэффициентов и среднеквадратичных отклонений зависят от длительности бестоковой паузы и определяются следующим образом.



Для коммутации успешного ТАПВ значения $\overline{K}_{удр}$ и $\sigma_{ур}$ определяются по кривым (рис. 3.3) по заданному значению бестоковой паузы $t_{апв}$.

Рис. 3.2. Зависимость $\overline{K}_{удр}$ (1) и $\sigma_{ур}$ (2) от значения уставки $\theta_а$ при разрыве электропередачи из-за асинхронного хода

Если в электропередачах 110÷500 кВ электромагнитные трансформаторы вынесены за линейный выключатель, т.е. установлены непосредственно на коммутируемом участке воздушной линии (ВЛ 500 кВ без шунтирующих реакторов), то независимо от длительности бестоковой паузы $\overline{K}_{удр}$=1,61 и $\sigma_{ур}$=0,183.

Рис. 3.3. Зависимость $\overline{K}_{удр}$ (1) и $\sigma_{ур}$ (2) при успешном ТАПВ от длительности бестоковой паузы

Для коммутации неуспешного ТАПВ (S5) по известному значению бестоковой паузы $t_{апв}$ и кривым (рис. 3.4) определяются значения $\overline{K}^{-}_{удр}$ и $\overline{K}^{+}_{удр}$, $\sigma^{-}_{ур}$ и $\sigma^{+}_{ур}$.

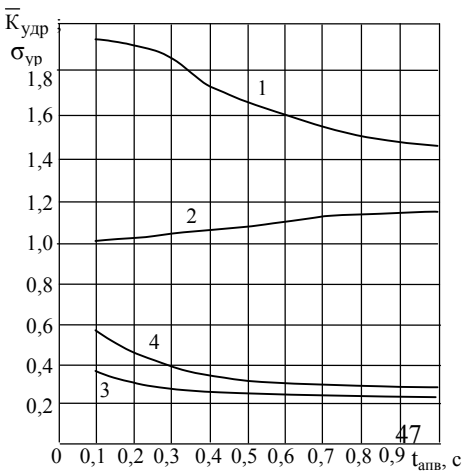
Статистические распределения амплитуд неограниченных перенапряжений для коммутаций S1÷S4 и S6÷S9 определяются по формуле

$$P(k) = P\left(\frac{k - \overline{K}_{уд}\overline{U}}{\overline{U}\sigma_y}\right).$$

В случае коммутации S5 для определения P(k) применяется формула

$$P(k) = 0{,}55P^{-}(k) + 0{,}85P^{+}(k),$$

где $P^{-}(k) = P\left(\frac{k - \overline{K}^{-}_{уд}\overline{U}}{\overline{U}\sigma^{-}_{y}}\right)$; $P^{+}(k) = P\left(\frac{k - \overline{K}^{+}_{уд}\overline{U}}{\overline{U}\sigma^{+}_{y}}\right)$.



Значения математических ожиданий вынужденных составляющих перенапряжений $\overline{U}$ для каждого вида коммутации рассчитываются по методике, изложенной в разд. 2.

Значения P(k) для задаваемого значения k определяются по кривой (рис. 3.5), причем

$$P(k) = P(y),$$

где $y = \dfrac{k - \overline{K}_{уд}\overline{U}}{\overline{U}}$.

Рис. 3.4. Зависимости ударных коэффициентов и среднеквадратичных отклонений от длительности бестоковой паузы при неуспешном ТАПВ:
$1 - \overline{K}^{-}_{удр}$; $2 - \overline{K}^{+}_{удр}$; $3 - \sigma^{-}_{ур}$; $4 - \sigma^{+}_{ур}$

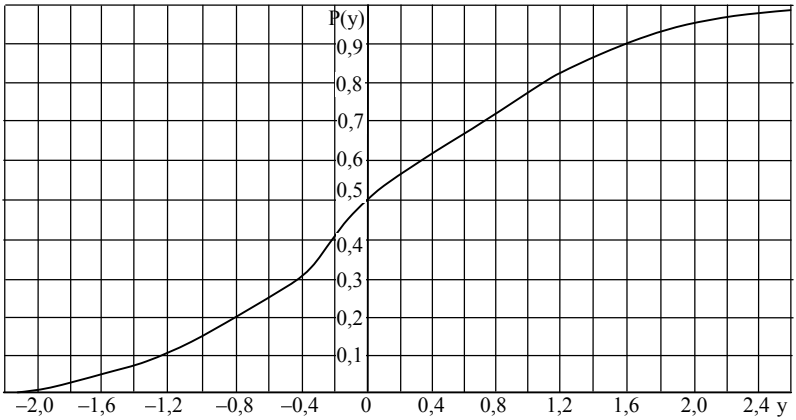


Рис. 3.5. Функция распределения амплитуд неограниченных перенапряжений

3.3. Расчет статистического распределения ресурса, расходуемого ОПН в течение года

Ресурс, расходуемый ОПН в течение года

$$T_{расх} = \sum_{s=1}^{n} N_s \overline{T}_{os} ,$$

где N_s – ожидаемое число воздействий на ОПН в коммутации S–типа в течение одного года эксплуатации (табл. 3.3); $\overline{T}_{os}$ – математическое ожидание ресурса, расходуемого в одной коммутации S–типа; n – количество видов коммутаций.

Математическое ожидание ресурса $\overline{T}_{os}$ определяется с помощью графического построения, показанного на рис. 3.6.

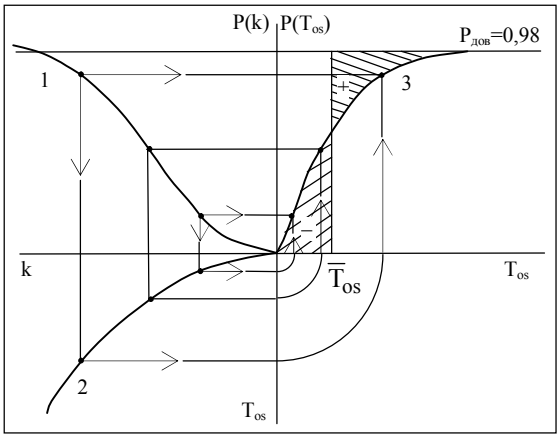


Рис. 3.6. Графическое определение математического ожидания ресурса $\overline{T}_{os}$, отвечающего заданной доверительной вероятности $P_{дов}$:
1 – P(k); 2 – k = f(T_{os}); 3 – P(T_{os})

В третьем квадранте строится функция k = f(T_{os}), вычисляемая по формуле

$$k = AT_{os}^{0,0111} + \frac{T_{os}^{0,286}}{b_s},$$

где k – неограниченные перенапряжения в коммутации S-типа; A – коэффициент, значения которого приведены в табл. 3.2; b_s – вспомогательный параметр.

Для электропередач 110÷330 кВ b_s=1. Для электропередач 500, 750 кВ, если в точке установки ОПН включен шунтирующий реактор, коэффициент b_s зависит от амплитуды неограниченных перенапряжений и равен $b_s = 1 + a_s/X_p$. Усредненные значения коэффициента a_s приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5. **Усредненные значения коэффициента a_s**

$U_{ном}$, кВ	**Значения k**					
	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	0,4

Во втором квадранте (рис. 3.6) размещается функция статистического распределения амплитуд неограниченных перенапряжений, рассчитанная по методике разд. 3.2. Затем графическим путем, ход кото-

рого показан стрелками на рис. 3.6, строится функция статистического распределения ресурса, расходуемого ОПН в одной коммутации S–типа – $P(T_{os})$.

Математическое ожидание $\overline{T}_{os}$, отвечающее заданной доверительной вероятности, определяется графически следующим образом. Из точки на оси $P(T_{os})$, соответствующей значению $P_{дов}$, проводится прямая, параллельная оси T_{os} (рис. 3.6). Затем проводится вертикальная линия, пересекающая функцию $P(T_{os})$, таким образом, чтобы заштрихованные площади, обозначенные на рис. 3.6 знаками «+» и «–», были равны. Точка пересечения этой прямой с осью T_{os} дает искомое значение $\overline{T}_{os}$.

Количество расчетов $P(T_{os})$ должно соответствовать количеству расчетных коммутаций для заданной электропередачи.

3.4. Определение ожидаемого срока службы ОПН

Математическое ожидание срока службы ОПН определяется по формуле

$$\overline{N}_{сл} = \frac{T_{исх}}{\overline{T}_{расх}} = \frac{T_{исх}}{\sum_{s=1}^{n} N_s \overline{T}_{os}(P_{дов})},$$

где $T_{исх}$– исходный ресурс, которым обладает вновь изготовленный ОПН; $\overline{T}_{расх}$ – математическое ожидание ресурса, расходуемого ОПН в процессе n коммутаций; N_s – ожидаемое число воздействий на ОПН (табл. 3.3); $\overline{T}_{os}(P_{дов})$ – математическое ожидание расходуемого ресурса при коммутации S –типа для заданного значения $P_{дов}$.

Значения исходного ресурса задаются техническими условиями на ОПН. Для ограничителей, изготавливаемых НПО «Электрокерамика», значения исходного ресурса [6] приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6. **Исходный ресурс ОПН**

$U_{ном}$, кВ	110	220	330	500	750
$T_{исх}$, отн. ед.	97	26	17	22	16

3.5. Пример расчета ожидаемого срока службы ОПН

3.5.1. Исходные данные

Требуется рассчитать ожидаемый срок службы ОПН, установленного в конце электропередачи 220 кВ, расчетная схема которой представлена на рис. 3.7.

Параметры электропередачи: номинальное напряжение $U_{ном}$= 220 кВ; длина линии *l*=80 км; волновое сопротивление линии по прямой последовательности $Z_л$=405 Ом; волновое сопротивление линии по нулевой последовательности $Z_л^{(0)} = 820$ Ом; коэффициенты изменения фазы по прямой последовательности β=1,0704·10^{-3} рад/км, по нулевой последовательности $\beta^{(0)}$=1,6336·10^{-3} рад/км. Реактивность питающей системы изменяется в течение года по прямой последовательности $X_{1макс}$=22 Ом, $X_{1мин}$=17, по нулевой последовательности $X_{1макс}^{(0)} = 19$ Ом, $X_{1мин}^{(0)} = 16$ Ом. Длительность бестоковой паузы для успешного и неуспешного ТАПВ $t_{апв}$=0,2 с.

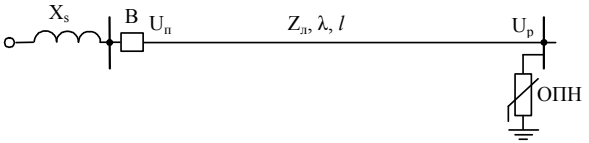


Рис. 3.7. Расчетная схема электропередачи

Для заданной схемы электропередачи расчетными являются следующие виды коммутации с соответствующими максимальными значениями ЭДС питающей системы (табл. 2.1):

S1 – плановое включение ненагруженной линии, $E_{макс}$=1;

S2 – успешное ТАПВ, $E_{макс}$=1,15;

S4 – трехфазный разрыв электропередачи вследствие ликвидации несимметричного КЗ, $E_{макс}$=1,2;

S5 – неуспешное ТАПВ, $E_{макс}$=1,15.

Минимальное значение ЭДС системы для всех видов коммутации $E_{мин}$=1.

3.5.2. Расчет вынужденных напряжений переходных процессов в симметричном режиме

Расчет ведется по методике, изложенной в разд. 2.1.

• *Плановое включение ненагруженной линии, S1.*

Волновая длина линии по прямой последовательности $\lambda = \beta l = 0{,}086$ рад.

Волновая длина эквивалентной линии, замещающей X_1,

для $X_{1макс}$ $$\varphi_{1макс} = \operatorname{arctg}\left(\frac{X_{1макс}}{Z_л}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{22}{405}\right) = 0{,}0543 \text{ рад};$$

для $X_{1мин}$ $$\varphi_{1мин} = \operatorname{arctg}\left(\frac{X_{1мин}}{Z_л}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{17}{405}\right) = 0{,}042 \text{ рад}.$$

Вынужденное напряжение на разомкнутом конце линии

$$U_{рмакс1} = E_{макс}\frac{\cos\varphi_{1макс}}{\cos(\lambda + \varphi_{1макс})} = 1\frac{\cos 0{,}0543}{\cos(0{,}086 + 0{,}0543)} = 1{,}0084;$$

$$U_{рмин1} = E_{мин}\frac{\cos\varphi_{1мин}}{\cos(\lambda + \varphi_{1мин})} = 1\frac{\cos 0{,}042}{\cos(0{,}086 + 0{,}042)} = 1{,}0073.$$

Вынужденное напряжение на питающем конце линии

$U_{пмакс1} = U_{рмакс1}\cos\lambda = 1{,}0084\cos 0{,}086 = 1{,}005;$

$U_{пмин1} = U_{рмин1}\cos\lambda = 1{,}0073\cos 0{,}086 = 1{,}0036.$

Поскольку $U_{пмакс1} < 1{,}15$, то учитывать насыщение магнитопроводов не нужно.

Математическое ожидание вынужденного напряжения на разомкнутом конце линии

$$\overline{U}_{р1} = \frac{U_{рмин1}\cdot U_{рмакс1}}{U_{рмакс1} - U_{рмин1}}\ell n\frac{U_{рмакс1}}{U_{рмин1}} = \frac{1{,}0073\cdot 1{,}0084}{1{,}0084 - 1{,}0073}\ell n\frac{1{,}0084}{1{,}0073} = 1{,}008.$$

• *Успешное ТАПВ, S2.*

Поскольку значение $E_{мин}$ принято одинаковым для всех коммутаций, то $U_{рмин2}=U_{рмин1}=1{,}0073$ и $U_{пмин2}=U_{пмин1}=1{,}0036$.

Для данной коммутации $E_{макс}=1{,}15$, поэтому

$U_{пмакс2} = E_{макс}U_{пмакс1} = 1{,}15\cdot 1{,}005 = 1{,}155$, что больше 1,15.

Следовательно, необходим учет насыщения магнитопроводов.

Характеристики питающих трансформаторов неизвестны, поэтому примем $Z_{баз}=10000$ Ом, тогда

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg}\left(\frac{X_{1макс}}{Z_{баз}}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{22}{10000}\right) = 2{,}2\cdot 10^{-3} \text{ рад};$$

$$\eta_2 = \frac{X_{1макс}\cos\varphi_2\cos\lambda}{Z_{баз}\cos(\lambda - \varphi_2)} = \frac{22\cdot\cos 0{,}0022\cdot\cos 0{,}086}{10000\cdot\cos 0{,}0838} = 0{,}0022.$$

По кривым $U_{нас} = f(\eta_2, U_п)$ (см. рис. 2.2) для $U_{пмакс2}=1{,}155$ находим значение напряжения с учетом насыщения $U_{пнмакс2}=1{,}15$, тогда

$$U_{\text{рмакс2}} = \frac{U_{\text{пнмакс2}}}{\cos\lambda} = \frac{1{,}15}{\cos 0{,}086} = 1{,}154 .$$

Математическое ожидание вынужденного напряжения на разомкнутом конце линии

$$\overline{U}_{\text{р2}} = \frac{U_{\text{рмин2}} \cdot U_{\text{рмакс2}}}{U_{\text{рмакс2}} - U_{\text{рмин2}}} \ell\text{n} \frac{U_{\text{рмакс2}}}{U_{\text{рмин2}}} = \frac{1{,}0073 \cdot 1{,}154}{1{,}154 - 1{,}0073} \ell\text{n} \frac{1{,}154}{1{,}0073} = 1{,}077 .$$

3.5.3. Расчет вынужденных напряжений переходных процессов в несимметричном режиме

Определим коэффициенты несимметрии h при КЗ в начале линии и в конце линии при максимальных и минимальных реактивностях питающей системы. Расчет выполняется по методике, изложенной в разд. 2.2.

Примем равными реактивности системы при прямой и обратной последовательностях, тогда $\nu_1=\nu_2=1$ и $\varepsilon = \frac{1}{2+\nu_0}$. Волновая длина линии по нулевой последовательности $\lambda^{(0)} = \beta^{(0)} l = 0{,}131$ рад.

КЗ в конце линии при $X_{1\text{макс}}=22$ Ом и $X^{(0)}_{1\text{макс}} = 19$ Ом:

$$\nu_0 = \frac{X^{(0)}_{1\text{макс}} \cos\lambda^{(0)} + Z^{(0)}_{\text{л}} \sin\lambda^{(0)}}{X_{1\text{макс}} \cos\lambda + Z_{\text{л}} \sin\lambda} = \frac{19\cos 0{,}131 + 820 \sin 0{,}131}{22\cos 0{,}086 + 405 \sin 0{,}086} = 2{,}223 ;$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2+\nu_0} = \frac{1}{2+2{,}223} = 0{,}237 ;$$

$$h_1 = \sqrt{1 + \varepsilon[\nu_0 - 1 + \varepsilon(1-\nu_0)^2]} = \sqrt{1 + 0{,}237[2{,}223 - 1 + 0{,}237(1-2{,}223)^2]} = 1{,}172.$$

КЗ в начале линии при $X_{1\text{макс}}=22$ Ом и $X^{(0)}_{1\text{макс}} = 19$ Ом:

$$\nu_0 = \frac{X^{(0)}_{1\text{макс}}}{X_{1\text{макс}}} = \frac{19}{22} = 0{,}864 ; \quad \varepsilon = \frac{1}{2+\nu_0} = \frac{1}{2+0{,}864} = 0{,}349 ;$$

$$h_2 = \sqrt{1 + \varepsilon[\nu_0 - 1 + \varepsilon(1-\nu_0)^2]} = \sqrt{1 + 0{,}349[0{,}864 - 1 + 0{,}349(1-0{,}864)^2]} = 0{,}977.$$

КЗ в конце линии при $X_{1\text{мин}}=17$ Ом и $X^{(0)}_{1\text{мин}} = 16$ Ом:

$$\nu_0 = \frac{X^{(0)}_{1\text{мин}} \cos\lambda^{(0)} + Z^{(0)}_{\text{л}} \sin\lambda^{(0)}}{X_{1\text{мин}} \cos\lambda + Z_{\text{л}} \sin\lambda} = \frac{16\cos 0{,}131 + 820 \sin 0{,}131}{17\cos 0{,}086 + 405 \sin 0{,}086} = 2{,}38 ;$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2+\nu_0} = \frac{1}{2+2{,}38} = 0{,}228;$$

$$h_3 = \sqrt{1+\varepsilon[\nu_0 - 1 + \varepsilon(1-\nu_0)^2]} = \sqrt{1+0{,}228[2{,}38-1+0{,}228(1-2{,}38)^2]} = 1{,}189.$$

КЗ в начале линии при $X_{1мин}$=17 Ом и $X_{1мин}^{(0)} = 16$ Ом:

$$\nu_0 = \frac{X_{1мин}^{(0)}}{X_{1мин}} = \frac{16}{17} = 0{,}941; \quad \varepsilon = \frac{1}{2+\nu_0} = \frac{1}{2+0{,}941} = 0{,}34;$$

$$h_2 = \sqrt{1+\varepsilon[\nu_0 - 1 + \varepsilon(1-\nu_0)^2]} = \sqrt{1+0{,}34[0{,}941-1+0{,}34(1-0{,}941)^2]} = 0{,}99.$$

Для расчета минимальных значений вынужденных напряжений при несимметричных режимах примем $h_{мин}$=0,99, а для максимальных значений – $h_{макс}$=1,172.

• *Трехфазный разрыв электропередачи вследствие ликвидации несимметричного КЗ, S4.*

$U_{пмин4}=U_{пмин1}h_{мин}=1{,}0036\cdot 0{,}99=0{,}994$;

$U_{рмин4}=U_{рмин1}h_{мин}=1{,}0073\cdot 0{,}99=0{,}997$.

Для данной коммутации $E_{макс}$=1,2, поэтому

$U_{пмакс4}=E_{макс}U_{пмакс1}h_{макс}=1{,}2\cdot 1{,}005\cdot 1{,}172=1{,}413$, что больше1,15.

Следовательно, необходим учет насыщения магнитопроводов.

По кривым $U_{нас}=f(\eta_2,U_п)$ (рис. 2.2) для $U_{пмакс4}$=1,413 и η_2=0,0022 находим значение напряжения с учетом насыщения $U_{пнмакс4}$=1,39, тогда

$$U_{рмакс4} = \frac{U_{пнмакс4}}{\cos\lambda} = \frac{1{,}39}{\cos 0{,}086} = 1{,}395.$$

Математическое ожидание вынужденного напряжения на разомкнутом конце линии

$$\overline{U}_{p4} = \frac{U_{рмин4}\cdot U_{рмакс4}}{U_{рмакс4}-U_{рмин4}}\ell n\frac{U_{рмакс4}}{U_{рмин4}} = \frac{0{,}997\cdot 1{,}395}{1{,}395-0{,}997}\ell n\frac{1{,}395}{0{,}997} = 1{,}174.$$

• *Неуспешное ТАПВ, S5.*

$U_{пмин5}=U_{пмин4}=0{,}994$; $U_{рмин5}=U_{рмин4}=0{,}997$.

Для данной коммутации $E_{макс}$=1,15, поэтому

$U_{пмакс5}=E_{макс}U_{пмакс1}h_{макс}=1{,}15\cdot 1{,}005\cdot 1{,}172=1{,}354$, что больше1,15.

Следовательно, необходим учет насыщения магнитопроводов.

По кривым $U_{нас} = f(\eta_2,U_п)$ (см. рис. 2.2) для $U_{пмакс5}$=1,354 и η_2=0,0022 находим значение напряжения с учетом насыщения $U_{пнмакс5}$=1,335, тогда

$$U_{рмакс5} = \frac{U_{пнмакс5}}{\cos\lambda} = \frac{1{,}335}{\cos 0{,}086} = 1{,}34.$$

Математическое ожидание вынужденного напряжения на разомкнутом конце линии

$$\overline{U}_{p5} = \frac{U_{рмин5} \cdot U_{рмакс5}}{U_{рмакс5} - U_{рмин5}} \ell n \frac{U_{рмакс5}}{U_{рмин5}} = \frac{0{,}997 \cdot 1{,}34}{1{,}34 - 0{,}997} \ell n \frac{1{,}34}{0{,}997} = 1{,}152 .$$

3.5.4. Расчет ресурса расходуемого ОПН в течение года

Расчет ведется по методике, изложенной в разд. 3.2, 3.3.

• *Плановое включение ненагруженной линии, S1.*

Для данной коммутации $\overline{K}_{уд1} = 1{,}61$ и σ_{y1}=0,183 (табл. 3.4), $\overline{U}_{p1} = 1{,}008$ (разд. 3.5.2), тогда статистическое распределение амплитуд неограниченных перенапряжений

$$P(k) = P\left(\frac{k - \overline{K}_{уд1}\overline{U}_{p1}}{\overline{U}_{p1}\sigma_{y1}} \right) = P\left(\frac{k - 1{,}61 \cdot 1{,}008}{1{,}008 \cdot 0{,}183} \right) = P\left(\frac{k - 1{,}623}{0{,}184} \right).$$

Обозначим $\frac{k - 1{,}623}{0{,}184} = y_1$, тогда $P_1(k)=P(y_1)$ и $k=0{,}184y_1 + 1{,}623$.

Задаваясь значением $P(y_1)$, по кривой (рис. 3.5) находим соответствующее значение y_1, по которому из уравнения $k = 0{,}184y_1 + 1{,}623$ находим значение k. Результаты расчета сводим в табл. 3.7.

Таблица 3.7. **Значения параметров распределения $P_1(k)$**

$P_1(k)$	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,98	1,0
y_1	–2,1	–1,6	–1,23	–0,8	–0,42	–0,21	0	0,33	0,72	1,1	1,6	2,52	2,7
k	1,236	1,328	1,396	1,475	1,545	1,584	1,623	1,684	1,756	1,826	1,918	2,088	2,121

Для каждого значения k из табл. 3.7, начиная со значения 1,396, соответствующего вероятности 0,1, до значения 2,088 ($P_1(k)$=0,98), используя формулу $k = AT_{os}^{0,0111} + \frac{T_{os}^{0,286}}{b_s}$, вычислим значения T_{os}.

Для рассматриваемой электропередачи A=1,75 (см. табл. 3.2), а b_s=1.

Тогда $k = 1{,}75T_{os}^{0,0111} + T_{os}^{0,286}$. Расчет можно произвести графически так, как это показано на рис. 3.6, или используя программу «Mathcad».

Обозначим для коммутации S1 T_{os} как T_{o1} и $P(T_{os})$ как $P(T_{o1})$. Результаты расчета приведены в табл. 3.8 и в виде графика на рис. 3.8. Причем следует иметь в виду, что вероятность появления перенапряжений с кратностью k P(k)=P(y) равна вероятности выработки ресурса

ОПН при воздействии на него перенапряжений с данной кратностью, т. е. $P(T_{os})=P(y)$.

Таблица 3.8. **Расчетные параметры функции $P(T_{o1}) = f(T_{o1})$**

$P(T_{o1})$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,98
k	1,396	1,475	1,545	1,584	1,623	1,684	1,756	1,826	1,918	2,088
T_{o1}	$1{,}2\cdot10^{-9}$	$1{,}1\cdot10^{-7}$	$2{,}9\cdot10^{-6}$	$1{,}3\cdot10^{-5}$	$4{,}5\cdot10^{-5}$	$2{,}2\cdot10^{-4}$	$9{,}4\cdot10^{-4}$	$2{,}8\cdot10^{-3}$	$8{,}7\cdot10^{-3}$	0,04

Для определения значения математического ожидания выработки ресурса ОПН при воздействии на него перенапряжений, вызванных коммутацией S1, проводим на рис. 3.8 вертикальную прямую так, чтобы площади, обозначенные знаками «+» и «–», при $P_{дов}=0{,}98$ были равны. Тогда точка пересечения этой прямой с осью T_{o1} даст искомое значение $\overline{T}_{o1} = 0{,}0026$.

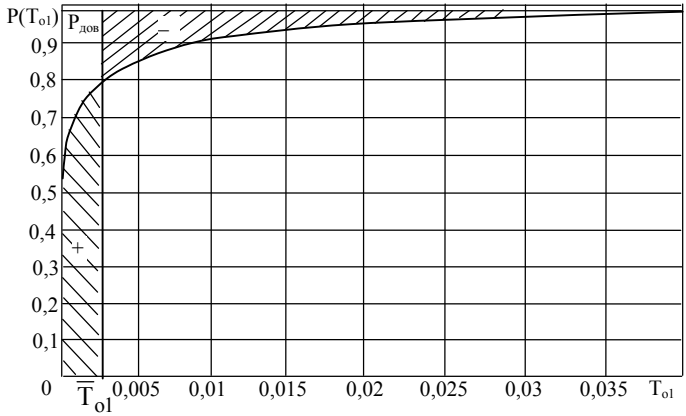


Рис. 3.8. Зависимость $P(T_{o1})$ и определение $\overline{T}_{o1}$ для коммутации S1

Количество ожидаемых воздействий в год при коммутации S1 равно $N_1=8$ (табл. 3.3), тогда выработка ресурса ОПН при рассматриваемой коммутации и доверительной вероятности $P_{дов}=0{,}98$ равна $\overline{T}_{o1} \cdot N_1 = 0{,}0208$.

• *Успешное ТАПВ, S2.*

Для $t_{апв}=0{,}2$ с по рис. 3.3 находим $\overline{K}_{уд2} = 1{,}68$ и $\sigma_{y2}=0{,}33$. Из разд. 3.5.2 $\overline{U}_{p2} = 1{,}077$, тогда статистическое распределение амплитуд неограниченных перенапряжений

$$P(k) = P\left(\frac{k - \overline{K}_{уд2}\overline{U}_{p2}}{\overline{U}_{p2}\sigma_{y2}}\right) = P\left(\frac{k - 1{,}68 \cdot 1{,}077}{1{,}077 \cdot 0{,}33}\right) = P\left(\frac{k - 1{,}809}{0{,}355}\right).$$

Обозначим $\frac{k - 1{,}809}{0{,}355} = y_2$, тогда $P_2(k)=P(y_2)$ и $k=0{,}355y_2 + 1{,}809$.

Задаваясь значением $P(y_2)$, по кривой (см. рис. 3.5) находим соответствующее значение y_2, по которому находим значение k. Результаты расчета сводим в табл. 3.8.

Таблица 3.8. **Значения параметров распределения $P_2(k)$**

$P_2(k)$	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,98	1,0
y_2	–2,1	–1,6	–1,23	–0,8	–0,42	–0,21	0	0,33	0,72	1,1	1,6	2,52	2,7
k	1,064	1,241	1,372	1,525	1,66	1,735	1,809	1,927	2,065	2,2	2,378	2,705	2,769

Для коммутации S2 обозначим T_{os} как T_{o2} и $P(T_{os})$ как $P(T_{o2})$. Для каждого значения k из табл. 3.8, начиная со значения 1,372, соответствующего вероятности 0,1, до значения 2,705 ($P_2(k)=0{,}98$), по уравнению $k = 1{,}75T_{os}^{0{,}0111} + T_{os}^{0{,}286}$ вычислим значения T_{o2}. Результаты расчета приведены в табл. 3.9 и в виде графика на рис. 3.9.

Таблица 3.9. Расчетные параметры функции $P(T_{o2})=f(T_{o2})$

$P(T_{o2})$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,98
k	1,372	1,525	1,66	1,735	1,809	1,927	2,065	2,2	2,378	2,705
T_{o2}	$3\cdot10^{-10}$	$1{,}2\cdot10^{-6}$	$1{,}2\cdot10^{-4}$	$6{,}4\cdot10^{-4}$	0,0022	0,0096	0,034	0,087	0,229	0,86

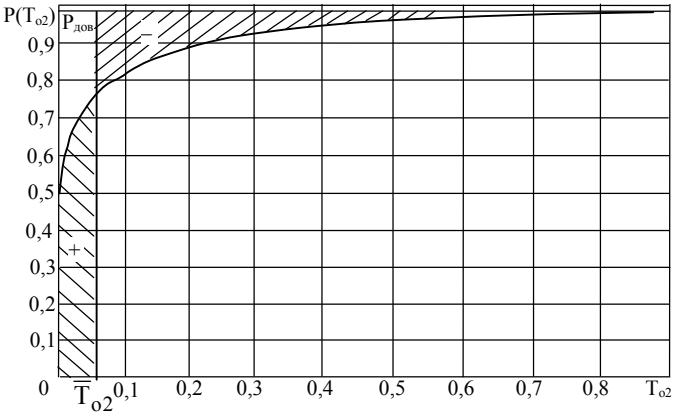


Рис. 3.9. Зависимость $P(T_{o2})$ и определение $\overline{T}_{o2}$ для коммутации S2

Из рис. 3.9 $\overline{T}_{o2} = 0{,}06$. Количество ожидаемых воздействий в год при коммутации S2 равно (см. табл. 3.3)

$$N_2 = 6{,}1\cdot10^{-2}l = 6{,}1\cdot10^{-2}\cdot80 = 4{,}88.$$

Выработка ресурса ОПН при коммутации S2 и доверительной вероятности $P_{дов}$=0,98 равна $\overline{T}_{o2} \cdot N_2 = 0{,}293$.

• *Трехфазный разрыв электропередачи вследствие ликвидации несимметричного КЗ, S4.*

Для данной коммутации $\overline{K}_{уд4} = 1{,}34$ и σ_{y4}=0,132 (табл. 3.4), $\overline{U}_{p4} = 1{,}174$ (разд. 3.5.3), тогда статистическое распределение амплитуд неограниченных перенапряжений

$$P(k) = P\left(\frac{k - \overline{K}_{уд4}\overline{U}_{p4}}{\overline{U}_{p4}\sigma_{y4}}\right) = P\left(\frac{k - 1{,}34 \cdot 1{,}174}{1{,}174 \cdot 0{,}132}\right) = P\left(\frac{k - 1{,}573}{0{,}155}\right).$$

Обозначим $\frac{k - 1{,}573}{0{,}155} = y_4$, тогда $P_4(k)=P(y_4)$ и $k = 0{,}155y_4 + 1{,}573$.

Задаваясь значением $P(y_4)$, по кривой (рис. 3.5) находим соответствующее значение y_4, по которому находим значение k. Результаты расчета сводим в табл. 3.10.

Таблица 3.10. **Значения параметров распределения $P_4(k)$**

$P_4(k)$	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,98	1,0
y_4	–2,1	–1,6	–1,23	–0,8	–0,42	–0,21	0	0,33	0,72	1,1	1,6	2,52	2,7
k	1,248	1,325	1,383	1,449	1,508	1,541	1,573	1,624	1,685	1,744	1,821	1,964	1,992

Для коммутации S4 обозначим T_{os} как T_{o4} и $P(T_{os})$ как $P(T_{o4})$. Для каждого значения k из табл. 3.10, начиная со значения 1,383, соответствующего вероятности 0,1, до значения 1,964 ($P_4(k)$=0,98), по уравнению $k = 1{,}75T_{os}^{0{,}0111} + T_{os}^{0{,}286}$ вычислим значения T_{o4}. Результаты расчета приведены в табл. 3.11 и в виде графика на рис. 3.10.

Таблица 3.11. **Расчетные параметры функции $P(T_{o4}) = f(T_{o4})$**

$P(T_{o4})$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,98
k	1,395	1,525	1,64	1,703	1,766	1,866	1,983	2,098	2,249	2,526
T_{o4}	$5{,}3\cdot10^{-10}$	$2{,}7\cdot10^{-8}$	$5{,}6\cdot10^{-7}$	$2{,}4\cdot10^{-6}$	$8{,}6\cdot10^{-6}$	$4{,}6\cdot10^{-5}$	$2{,}3\cdot10^{-4}$	$7{,}6\cdot10^{-4}$	$2{,}6\cdot10^{-3}$	0,014

Из рис. 3.10 $\overline{T}_{o4} = 0{,}0008$. Количество ожидаемых воздействий в год при коммутации S4 равно (см. табл. 3.3)

$$N_4 = 10^{-2}l = 10^{-2}\cdot 80 = 0{,}8.$$

Выработка ресурса ОПН при коммутации S4 и доверительной вероятности $P_{дов}$=0,98 равна $\overline{T}_{o4} \cdot N_4 = 0{,}00064$.

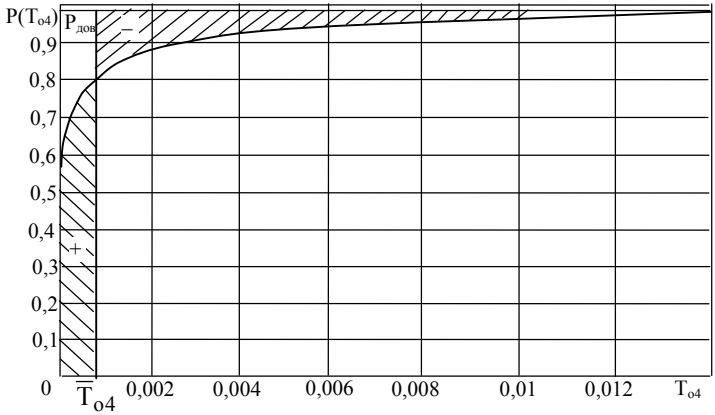


Рис. 3.10. Зависимость $P(T_{o4})$ и определение $\overline{T}_{o4}$ для коммутации S4

• *Неуспешное ТАПВ, S5.*

Для $t_{апв}$=0,2 с по рис. 3.4 находим $\overline{K}^{-}_{уд5} = 1{,}9$, $\sigma^{-}_{y5} = 0{,}3$ и $\overline{K}^{+}_{уд5} = 1{,}04$, $\sigma^{+}_{y5} = 0{,}46$. Из разд. 3.5.3 $\overline{U}_{p5} = 1{,}152$, тогда статистическое распределение амплитуд неограниченных перенапряжений

$$P^{-}_5(k) = P\left(\frac{k^{-} - \overline{K}^{-}_{уд5}\overline{U}_{p5}}{\overline{U}_{p5}\sigma^{-}_{y5}}\right) = P\left(\frac{k^{-} - 1{,}9 \cdot 1{,}152}{1{,}152 \cdot 0{,}3}\right) = P\left(\frac{k^{-} - 2{,}189}{0{,}346}\right);$$

$$P^{+}_5(k) = P\left(\frac{k^{+} - \overline{K}^{+}_{уд5}\overline{U}_{p5}}{\overline{U}_{p5}\sigma^{+}_{y5}}\right) = P\left(\frac{k^{+} - 1{,}04 \cdot 1{,}152}{1{,}152 \cdot 0{,}46}\right) = P\left(\frac{k^{+} - 1{,}198}{0{,}53}\right).$$

Пусть $\frac{k^{-} - 2{,}189}{0{,}346} = \frac{k^{+} - 1{,}198}{0{,}53} = y_5$, тогда $k^{-}=0{,}346y_5 + 2{,}189$ и $P^{-}_5(k) = P(k^{-}) = P(y_5)$; $k^{+}=0{,}53y_5 + 1{,}198$ и $P^{+}_5(k) = P(k^{+}) = P(y_5)$.

Задаваясь значением $P(y_5)$, по кривой (рис. 3.5) находим соответствующее значение y_5, по которому находим значения k^{-} и k^{+}. Результаты расчета сводим в табл. 3.12.

Таблица 3.12. **Значения параметров k**

P(y5)	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,98	1,0
y_5	–2,1	–1,6	–1,23	–0,8	–0,42	–0,21	0	0,33	0,72	1,1	1,6	2,52	2,7
k^{-}	1,463	1,636	1,764	1,912	2,044	2,116	2,189	2,303	2,438	2,569	2,742	3,06	3,122
k^{+}	0,085	0,35	0,546	0,774	0,976	1,087	1,198	1,373	1,58	1,781	2,046	2,533	2,629

По данным табл. 3.12 построим две зависимости $P^{-}_5(k)$ и $P^{+}_5(k)$ на рис. 3.11.

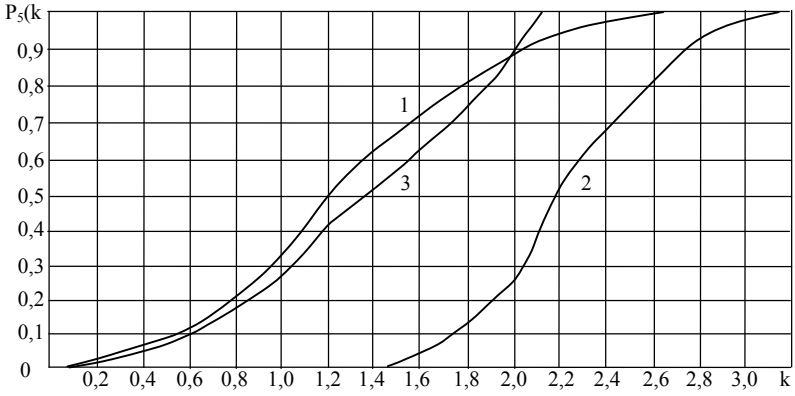


Рис. 3.11. Зависимости P(k) для коммутации S5: 1 – $P_5^+(k)$; 2 – $P_5^-(k)$; 3 – $P_5(k)$

Задавая значения k и определяя по рис. 3.11 соответствующие значения $P_5^+(k)$ и $P_5^-(k)$, рассчитаем значения $P_5(k)$ по формуле

$$P_5(k) = 0{,}55P_5^-(k) + 0{,}85P_5^+(k).$$

Результаты расчета сведем в табл. 3.13, а на рис. 3.11 представим графически в виде функции $P_5(k) = f(k)$.

Таблица. 3.13. **Значения параметров распределения $P_5(k)$**

k	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,46	1,6	1,8	1,9	2,0	2,1	2,15
$P_5^+(k)$	0,06	0,12	0,21	0,32	0,5	0,61	0,64	0,71	0,8	0,84	0,88	0,91	0,925
$P_5^-(k)$	0	0	0	0	0	0	0,0	0,04	0,12	0,18	0,27	0,38	0,45
$P_5(k)$	0,05	0,1	0,18	0,27	0,43	0,52	0,54	0,626	0,746	0,814	0,897	0,983	1,034

Для коммутации S5 обозначим T_{os} как T_{o5} и $P(T_{os})$ как $P(T_{o5})$. Для каждого значения k из табл. 3.13, начиная со значения 1,4, соответствующего вероятности 0,52, до значения 2,1 ($P_5(k)=0{,}98$), по уравнению $k = 1{,}75T_{os}^{0{,}0111} + T_{os}^{0{,}286}$ вычислим значения T_{o5}. Результаты расчета приведены в табл. 3.14 и в виде графика на рис. 3.12.

Таблица 3.14. **Расчетные параметры функции $P(T_{o5})=f(T_{o5})$**

$P(T_{o5})$	0,52	0,626	0,7	0,746	0,8	0,85	0,897	0,94	0,98
k	1,4	1,6	1,72	1,8	1,88	1,95	2	2,06	2,1
T_{o5}	$1{,}5\cdot10^{-9}$	$2{,}2\cdot10^{-5}$	$4{,}7\cdot10^{-4}$	$1{,}9\cdot10^{-3}$	$5{,}7\cdot10^{-3}$	0,012	0,02	0,32	0,044

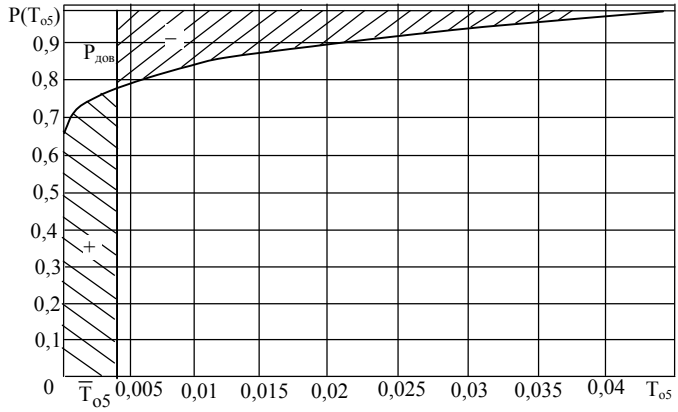


Рис. 3.12. Зависимость $P(T_{o5})$ и определение $\overline{T}_{o5}$ для коммутации S5

Из рис. 3.12 $\overline{T}_{o5} = 0{,}004$. Количество ожидаемых воздействий в год при коммутации S4 равно (см. табл. 3.3)

$$N_4 = 2{,}15\cdot 10^{-2} l = 2{,}15\cdot 10^{-2}\cdot 80 = 1{,}72.$$

Выработка ресурса ОПН при коммутации S5 и доверительной вероятности $P_{дов}$=0,98 равна $\overline{T}_{o5} \cdot N_5 = 0{,}00688$.

• *Определение ресурса, расходуемого ОПН в течение года.*

Математическое ожидание ресурса ОПН, расходуемого в течение года, при доверительной вероятности $P_{дов}$=0,98 определяется по формуле

$$\overline{T}_{расх} = \sum_{S=1}^{4} N_S \overline{T}_{oS} = N_1\overline{T}_{o1} + N_2\overline{T}_{o2} + N_4\overline{T}_{o4} + N_5\overline{T}_{o5} =$$

$$=0{,}0208 + 0{,}293 + 0{,}00064 + 0{,}00688=0{,}32132 \text{ о.е.}$$

3.5.5. Расчет ожидаемого срока службы ОПН

Значение исходного ресурса ОПН 220 кВ составляет $T_{исх}$=26 о. е. (см. табл. 3.6), тогда математическое ожидание срока службы ОПН

$$N_{сл} = \frac{T_{исх}}{T_{расх}} = \frac{26}{0{,}3213} = 80{,}9 \text{ лет.}$$

Ожидаемый срок службы значительно превышает нормируемый (25 лет), что говорит о высокой надежности работы ОПН в рассматриваемой электропередаче.

4. Последовательность выполнения курсовой работы

Курсовая работа состоит из двух частей – теоретической и расчетной части.

В теоретической части необходимо привести описание конструкции и принцип действия современных ограничителей напряжений. Для этого можно воспользоваться либо дополнительным материалом к курсовой работе, либо найти информацию самостоятельно.

В расчетной части необходимо выполнить расчет ожидаемого срока службы ОПН в соответствии с пунктом 3.5 и следующими исходными данными:

Таблица 4 Задание на курсовую работу

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{ном}$, кВ	220	110	220	330	110	220	330	330	220	110
l, км	80	60	75	90	50	70	100	120	65	70
$Z_{л,}$ Ом	405	400	410	380	350	450	480	420	430	480
$Z_{л}^{(0)}$	820	800	810	780	750	850	880	830	870	900
$X_{1макс}$	22	26	24	25	29	30	33	27	28	36
$X_{1мин}$	17	20	18	20	22	23	26	21	22	28
$X_{1макс}^{(0)}$	19	23	21	22	25	26	29	24	24	31
$X_{1мин}^{(0)}$	16	19	17	18	21	22	24	20	21	26

Остальные параметры принимаются в соответствии с пунктом 3.5 и данными методическими указаниями.

Библиографический список

1. **Руководство** по защите электрических сетей 6÷1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений РД 153-34.3-35.125-99 / под ред. Н.Н. Тиходеева. – 2-е изд. – СПб.: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. – 353 с.

2. **Правила** устройств электроустановок. – 6-7-е изд., измен. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 928 с.

3**. Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – 15 изд. с дополнениями, 2000.

4. **ГОСТ** Р 52725-2007. Ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 2007.

5. **Методические указания** по применению ограничителей в электрических сетях 6-35 кВ. – М.: Изд-во НТК «Электропроект», 2001. – 74 с.

6. **Методические указания** по применению ограничителей в электрических сетях 110÷750 кВ. – М.: Изд-во НТК «Электропроект», 2000. – 68 с.

7. **Дмитриев, М.В.** Применение ОПН в электрических сетях 6÷750 кВ / М.В. Дмитриев. – СПб. : НИВА, 2007. – 60 с.

8. **Дмоховская, Л.Ф**. Инженерные расчеты внутренних перенапряжений в электропередачах / Л.Ф. Дмоховская.– М. : Энергия, 1972.–288 с.

9. **Перенапряжения** и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения / М.В. Костенко [и др.]. – Л. : Наука, 1988. – 302 с.

10. **Техника** высоких напряжений: учебник для вузов / И.М. Богатенков [и др.]; под ред. Г.С. Кучинского. – СПб. : Энергоатомиздат. СПб, отд-е, 2003. – 608 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1. **Характеристики «напряжение – время» для ОПН различных типов и производителей**

Тип ОПН	K_t	Диапазон изменения времени t, с	Коэф-ты х-ки $K_t = a - b \cdot lgt$			
			Х-ка типа А		Х-ка типа В	
			a	b	a_1	b_1
Производитель ЗАО «Феникс–88»						
ОПН 110 кВ	$U/U_{нро}$	0,1 – 7200	1,4	0,065	–	–
ОПН 150 и 220 кВ	$U/U_{нро}$	0,1 – 7200	1,41	0,066	–	–
ОПН 330 кВ	$U/U_{нро}$	0,1 – 7200	1,424	0,066	–	–
ОПН 500/303 и 318	$U/U_{нро}$	0,1 – 7200	1,418	0,066	–	–
ОПН 500/333	$U/U_{нро}$	0,1 – 7200	1,4	0,064	–	–
ОПНН 110	$U/U_{нро}$	0,1 – 7200	1,5	0,07	–	–
ОПНН 220	$U/U_{нро}$	0,1 – 7200	1,439	0,069	–	–
Производитель ЗАО «Полимер–Аппарат»						
ОПНп, I_{2000}= 550А	$U/U_{нро}$	0,1 – 21600	1,39	0,057	1,442	0.058
ОПНп, $I_{2000} \geq$ 800А	$U/U_{нро}$	0,1 – 21600	1,4256	0,0544	1,5038	0.0562
Производитель ЗАО «АВВ УЭТМ»						
PEXLIM R и Q 110 кВ	$U/U_{н}$	0,1 – 10000	1,1467	0,0493	–	–
PEXLIM P 110 кВ	$U/U_{н}$	0,1 – 10000	1,1579	0,06	–	–
PEXLIM Q и P 220 кВ	$U/U_{н}$	0,1 – 10000	1,1477	0,05	–	–
PEXLIM P 330 кВ	$U/U_{н}$	0,1 – 10000	1,1482	0,051	–	–
EXLIM R	$U/U_{н}$	0,1 – 10000	1,15	0,05	1,194	0,056
EXLIM Q и P	$U/U_{н}$	0,1 – 10000	1,16	0,06	1,194	0,056
EXLIM T	$U/U_{н}$	0,1 – 10000	1,14	0,06	1,183	0,057
Производитель ЗАО « НИИ защитных аппаратов и изоляторов»						
ОПН 110; 220 10/400÷800; ОПН 330 10/800÷1400	$U/U_{нро}$	0,1 – 20000	1,427	0,057	1,477	0,0575

Примечания:

1) Характеристика типа А – характеристика «напряжение – время» с предварительным нагружением нормируемой энергией; характеристика типа В – характеристика «напряжение – время» без предварительного нагружения нормируемой энергией.

2) Для ОПН производства ЗАО «Феникс–88» и ЗАО «АВВ УЭТМ» даны усредненные значения коэффициентов, которые должны быть уточнены для выбранного ограничителя по значениям напряжений характеристики «напряжение – время», приведенных в каталогах ОПН соответствующих производителей.

Таблица П2. **Характеристика «напряжение – время» для ОПН Завода энергозащитных устройств (ЗАО ЗЭУ)**

Длительность напряжения, с	0,1	1	10	100	1200	3600
Характеристика типа А, $U/U_{нро}$	1,45	1,4	1,35	1,28	1,2	1,15
Характеристика типа В, $U/U_{нро}$	1,55	1,48	1,42	1,36	1,28	1,24

Таблица П3. **Основные характеристики ОПН производства ЗАО «Полимер–Аппарат» для применения в электрических сетях 110÷220 кВ**

Тип ОПН	$U_{ноо}$, кВ	$U_{н}$, кВ	I_{2000}, А	$I_{ср}$, кА	$L_{у}$, см	$W_{опн}$, кДж	$U_{остк}$, кВ, при токах, А			$U_{остт}$, кВ, при токах, кА		
							250	500	1000	5	10	20
ОПНп–110/550/56	56	70	550	40	260	181,4	134	139	148	166	180	202
ОПНп–110/550/59	59	73,8	550	40	260	191	141	147	156	174	189	213
ОПНп–110/550/73	73	94	550	40	280	236,5	174	181	193	216	234	253
ОПНп–110/550/77	77	99	550	40	280	249,5	183	191	203	228	246	277
ОПНп–110/550/84	84	105	550	40	320	272	200	209	222	248	269	303
ОПНп–110/550/88	88	110	550	40	320	285	109	218	232	260	282	317
ОПНп–110/550/100	100	125	550	40	320	324	238	248	264	296	320	360
ОПНп–110/800/77	77	94	800	40	320	356,5	193	203	215	229	246	271
ОПНп–110/800/88	88	99	800	40	320	407,4	221	232	246	262	282	309
ОПНп–110/800/100	100	125	800	40	320	463	251	263	280	298	320	351
ОПНп–220/800/146	146	192	800	40	640	676	367	384	408	434	467	513
ОПНп–220/800/152	152	200	800	40	640	704	382	400	425	452	486	534
ОПНп–220/800/176	176	220	800	40	640	815	442	463	492	524	563	618

Таблица П4. **Основные характеристики ОПН производства ЗАО «Полимер–Аппарат» для применения в электрических сетях 330 кВ**

Тип ОПН	$U_{ноо}$, кВ	$U_{н}$, кВ	I_{2000}, А	$I_{ср}$, кА	$L_{у}$, см	$W_{опн}$, кДж	$U_{остк}$, кВ, при токах, А			$U_{остт}$, кВ, при токах, кА		
							500	1000	2000	10	20	40
ОПНп–330/800/210	210	276	800	40	910	972	553	588	–	625	672	738
ОПНп–330/800/220	220	289	800	40	910	1019	579	616	–	655	704	773
ОПНп–330/800/230	230	302	800	40	910	1065	605	644	–	684	736	808
ОПНп–330/1200/210	210	276	1200	40	910	1432	493	516	538	–	609	666
ОПНп–330/1200/220	220	289	1200	40	910	1500	516	541	564	638	697	749
ОПНп–330/1200/230	230	302	1200	40	910	1569	540	566	589	667	729	784

Таблица П5. **Основные характеристики ОПН производства ЗАО «Феникс–88» для применения в электрических сетях 220÷330 кВ**

Тип ОПН	$U_{ноо}$, кВ	$U_{н}$, кВ	I_{2000}, А	$I_{ср}$, кА	$L_{у}$, см	$W_{опн}$, кДж	$U_{остк}$, кВ при токах, А			$U_{остт}$, кВ при токах, кА		
							500	1000	2000	5	10	20
ОПН–220/146–10/450	146	192	450	63	481	730	382	401	424	468	508	571
ОПН–220/157–10/450	157	210	450	63	481	785	412	432	458	505	547	615
ОПН–220/176–10/450	176	234	450	63	481	880	463	486	514	567	615	692
ОПН-220/146-10/800	146	192	800	63	481	1168	368	378	395	431	464	510
ОПН-220/157-10/800	157	210	800	63	481	1256	391	402	419	457	493	542
ОПН-220/176-10/800	176	234	800	63	481	1408	439	452	470	514	554	609
ОПН-220/146-20/1240	146	192	1240	63	481	2044	357	368	383	412	436	470
ОПН-220/157-20/1240	157	210	1240	63	481	2198	379	391	407	438	464	499
ОПН-220/176-20/1240	176	234	1240	63	481	2464	426	440	458	493	521	561
ОПН-330/210-10/800	210	282	800	63	742	1680	538	551	575	628	676	744
ОПН-330/220-10/800	220	294	800	63	742	1760	564	578	604	658	709	780
ОПН-330/230-10/800	230	306	800	63	742	1840	589	604	630	688	741	815

Окончание табл. П5

Тип ОПН	$U_{про}$, кВ	$U_н$, кВ	I_{2000}, А	$I_{ср}$, кА	$L_у$, см	$W_{опн}$, кДж	$U_{остк}$, кВ при токах, А			$U_{остт}$, кВ при токах, кА		
							500	1000	2000	5	10	20
ОПН-330/210-20/1240	210	282	1240	63	742	2646	525	542	564	607	642	691
ОПН-330/220-20/1240	220	294	1240	63	742	2772	550	568	591	636	673	724
ОПН-330/230-20/1240	230	306	1240	63	742	2898	576	594	618	666	704	758
ОПН-330/210-20/2200	210	282	2200	63	742	4746	501	517	537	568	596	633
ОПН-330/220-20/2200	220	294	2200	63	742	4972	525	542	563	595	625	663
ОПН-330/230-20/2200	230	306	2200	63	742	5198	549	567	589	622	654	694

Таблица П6. **Основные характеристики ОПН производства ЗАО «Феникс–88» для применения в электрических сетях 110 кВ**

Тип ОПН	$U_{про}$, кВ	$U_н$, кВ	I_{2000}, А	$I_{ср}$, кА	$L_у$, см	$W_{опн}$, кДж	$U_{остк}$, кВ, при токах, А			$U_{остт}$, кВ, при токах, кА		
							250	500	1000	5	10	20
ОПН–110/73–10/450	73	96	450	63	227	365	182	188	197	230	249	280
ОПН–110/80–10/450	80	102	450	63	227	400	199	206	216	252	274	308
ОПН–110/88–10/450	88	114	450	63	227	440	208	216	226	264	287	322
ОПН–110/73–10/800	73	96	800	63	227	584	175	178	183	208	224	237
ОПН–110/80–10/800	80	102	800	63	227	640	192	194	201	229	247	271
ОПН–110/88–10/800	88	114	800	63	227	704	212	216	222	252	272	299

Таблица П7. **Основные характеристики ОПН производства ЗАО «АВВ УЭТМ» для применения в электрических сетях 110÷220 кВ**

Тип ОПН	$U_{про}$, кВ	$U_н$, кВ	I_{2000}, А	$I_{ср}$, кА	$L_у$, см	$W_{опн}$, кДж	$U_{остк}$, кВ при токах, А			$U_{остт}$, кВ при токах, кА		
							500	1000	2000	5	10	20
Номинальное напряжение сети 110 кВ												
PEXLIM R72	58	72	550	40	227	180	148	152	158	171	180	198
PEXLIM R90	72	90	550	40	362,5	225	184	190	198	214	225	248
PEXLIM R96	77	96	550	40	362,5	240	197	203	211	228	240	264
PEXLIM R102	82,6	102	550	40	362,5	255	209	215	224	243	255	281
PEXLIM R108	84	108	550	40	362,5	270	221	228	237	257	270	297
PEXLIM R120	98	120	550	40	362,5	300	246	253	264	285	300	330
PEXLIM R132	106	132	550	40	454	330	270	279	290	314	330	363
PEXLIM R138	111	138	550	40	454	345	282	291	303	328	345	380
PEXLIM Q72	58	72	900	50	227	324	139	143	149	161	170	187
PEXLIM Q90	72	90	900	50	362,5	405	173	179	186	201	212	233
PEXLIM Q96	77	96	900	50	362,5	432	185	191	198	215	226	249
PEXLIM Q102	82,6	102	900	50	362,5	459	196	203	210	228	240	264
PEXLIM Q108	84	108	900	50	362,5	486	208	214	223	242	254	280
PEXLIM Q120	98	120	900	50	362,5	540	231	238	248	268	282	311
PEXLIM Q129	104	129	900	50	454	580,5	248	256	266	288	304	334
PEXLIM Q132	106	132	900	50	454	594	254	262	272	295	311	342
PEXLIM Q138	111	138	900	50	454	621	265	274	285	309	325	357
PEXLIM Q144	115	144	900	50	454	648	277	286	297	322	339	373
PEXLIM P72	58	72	1350	50	227	504	–	141	146	156	164	180

Продолжение табл. П7

Тип ОПН	$U_{про}$, кВ	$U_н$, кВ	I_{2000}, А	$I_{ср}$, кА	$L_у$, см	$W_{опн}$, кДж	$U_{остк}$, кВ при токах, А			$U_{остт}$, кВ при токах, кА		
							500	1000	2000	5	10	20
PEXLIM P72	58	72	1350	50	227	504	–	141	146	156	164	180
PEXLIM P90	72	90	1350	50	362,5	630	–	176	182	195	205	225
PEXLIM P96	77	96	1350	50	362,5	672	–	138	194	208	219	240
PEXLIM P102	83,4	102	1350	50	362,5	714	–	201	209	223	235	257
PEXLIM P108	84	108	1350	50	362,5	758	–	211	219	234	246	270
PEXLIM P114	92,3	114	1350	50	362,5	798	–	223	231	247	260	284
PEXLIM P120	98	120	1350	50	362,5	840	–	234	243	260	273	299
PEXLIM P129	104	129	1350	50	454	903	–	252	262	279	294	322
PEXLIM P132	106	132	1350	50	454	924	–	258	267	286	301	329
PEXLIM P138	111	138	1350	50	454	966	–	270	279	299	314	344
PEXLIM P144	115	144	1350	50	454	1008	–	281	291	312	328	359
Номинальное напряжение сети 220 кВ												
PEXLIM Q180	144	180	900	50	725	810	346	357	371	402	423	466
PEXLIM Q192	154	192	900	50	725	864	369	381	396	429	452	497
PEXLIM Q198	160	198	900	50	725	891	381	393	408	443	466	512
PEXLIM Q210	170	210	900	50	725	945	404	417	433	469	494	543
PEXLIM Q216	175	216	900	50	725	972	415	428	445	483	508	559
PEXLIM Q219	177	219	900	50	725	985,5	421	434	451	489	515	567
PEXLIM Q222	179	222	900	50	725	999	427	440	458	496	522	574
PEXLIM Q228	180	228	900	50	725	1028	438	452	470	510	536	590
PEXLIM P180	144	180	1350	50	725	1260	–	351	364	390	410	449
PEXLIM P192	154	192	1350	50	725	1344	–	375	388	415	437	479
PEXLIM P198	160	198	1350	50	725	1386	–	387	400	428	451	494
PEXLIM P210	170	210	1350	50	725	1470	–	410	425	454	478	524
PEXLIM P214	173	214	1350	50	725	1498	–	419	434	464	488	535
PEXLIM P216	175	216	1350	50	725	1512	–	422	437	467	492	539
PEXLIM P219	177	219	1350	50	725	1533	–	427	443	474	499	546
PEXLIM P222	179	222	1350	50	725	1554	–	433	449	480	506	554
PEXLIM P228	180	228	1350	50	725	1596	–	445	461	493	519	568
Номинальное напряжение сети 110 кВ												
EXLIM R72	58	72	550	50	265	180	149	154	162	176	187	209
EXLIM R90	72	90	550	50	368,5	225	186	193	202	220	234	262
EXLIM R96	77	96	550	50	368,5	240	198	206	215	235	249	279
EXLIM R108	84	108	550	50	368,5	270	223	231	242	264	280	314
EXLIM R120	98	120	550	50	368,5	300	247	257	269	294	311	349
EXLIM R132	106	132	550	50	368,5	330	272	283	296	323	342	383
EXLIM R138	111	138	550	50	368,5	345	284	295	309	338	358	401
EXLIM Q72	58	72	900	65	368,5	324	139	143	149	161	170	187
EXLIM Q90	72	90	900	65	368,5	405	173	179	186	201	212	233
EXLIM Q96	77	96	900	65	368,5	432	185	191	198	215	226	249
EXLIM Q108	84	108	900	65	368,5	486	208	214	223	242	254	280
EXLIM Q120	98	120	900	65	368,5	540	231	238	248	268	282	311
EXLIM Q132	106	132	900	65	368,5	594	254	262	272	295	311	342

Окончание табл. П7

Тип ОПН	$U_{про}$, кВ	$U_н$, кВ	I_{2000}, А	$I_{ср}$, кА	$L_у$, см	$W_{опн}$, кДж	$U_{остк}$, кВ при токах, А			$U_{остт}$, кВ при токах, кА		
							500	1000	2000	5	10	20
EXLIM Q138	111	138	900	65	368,5	621	265	274	285	309	325	357
EXLIM P72	58	72	1350	63	443,2	504	141	146	150	156	164	180
EXLIM P90	72	90	1350	63	443,2	630	176	182	187	195	205	225
EXLIM P96	77	96	1350	63	443,2	672	188	194	199	208	219	240
EXLIM P108	84	108	1350	63	443,2	756	211	219	224	234	246	270
EXLIM P120	98	120	1350	63	443,2	840	234	243	249	260	273	299
EXLIM P132	106	132	1350	63	443,2	924	258	267	274	286	301	329
EXLIM P138	111	138	1350	63	443,2	966	270	279	286	299	214	344
Номинальное напряжение сети 220 кВ												
EXLIM Q180	144	180	900	65	368,5	810	346	357	371	402	423	466
EXLIM Q192	154	192	900	65	633,6	864	369	381	396	429	452	497
EXLIM Q198	160	198	900	65	633,6	891	381	393	408	443	466	512
EXLIM Q210	170	210	900	65	633,6	945	404	417	433	469	494	543
EXLIM Q216	175	216	900	65	633,6	972	415	428	445	483	508	559
EXLIM Q219	177	219	900	65	633,6	985,5	421	434	451	489	515	567
EXLIM Q222	179	222	900	65	633,6	999	427	440	458	496	522	574
EXLIM Q228	180	228	900	65	633,6	1026	438	452	470	510	536	590
EXLIM P180	144	180	1350	63	443	1260	351	364	373	390	410	449
EXLIM P192	154	192	1350	63	657	1344	375	388	398	415	437	479
EXLIM P198	160	198	1350	63	657	1386	387	400	410	428	451	494
EXLIM P210	170	210	1350	63	657	1470	410	425	435	454	478	524
EXLIM P216	175	216	1350	63	657	1512	422	437	448	467	492	539
EXLIM P219	177	219	1350	63	657	1533	427	443	454	474	499	546
EXLIM P228	180	228	1350	63	657	1596	445	461	473	493	519	568
EXLIM T180	144	180	1900	63	443	1800	346	356	363	381	396	428
EXLIM T192	154	192	1900	63	657	1920	369	380	387	406	423	457
EXLIM T198	160	198	1900	63	657	1980	381	392	399	419	436	471
EXLIM T210	170	210	1900	63	657	2100	404	415	423	444	462	499
EXLIM T216	175	216	1900	63	657	2160	415	427	435	457	476	514
EXLIM T219	177	219	1900	63	657	2190	421	433	441	463	482	521
EXLIM T228	180	228	1900	63	657	2280	438	451	459	482	502	542
Номинальное напряжение сети 330 кВ												
PEXLIM P258	209	258	1350	50	978,2	1806	504	522	535	558	587	643
PEXLIM P264	212	264	1350	50	978,2	1848	515	534	547	571	601	658
PEXLIM P276	221	276	1350	50	978,2	1932	539	558	572	597	628	688
PEXLIM P288	230	288	1350	50	978,2	2016	562	582	597	623	656	718
EXLIM P258	209	258	1350	63	771,7	1806	504	522	535	558	587	643
EXLIM P264	212	264	1350	63	771,7	1848	515	534	547	571	601	658
EXLIM P276	221	276	1350	63	771,7	1932	539	558	572	597	628	688
EXLIM P288	230	288	1350	63	771,7	2016	562	582	597	623	656	718
EXLIM T258	209	258	1900	63	771,7	2580	496	510	520	545	568	614
EXLIM T264	212	264	1900	63	771,7	2640	508	522	532	558	581	628
EXLIM T276	221	276	1900	63	771,7	2760	531	546	556	583	608	656
EXLIM T288	230	288	1900	63	771,7	2880	554	569	580	609	634	685

Таблица П8. **Основные характеристики ОПН производства ЗАО «НИИ защитных аппаратов и изоляторов» для применения в электрических сетях 110÷330 кВ**

Тип ОПН	$U_{про}$, кВ	$U_{н}$, кВ	I_{2000}, А	$I_{ср}$, кА	$L_{у}$, см	$W_{опн}$, кДж	$U_{остк}$, кВ, при токах, А			$U_{остт}$, кВ, при токах, кА		
							500	1000	2000	5	10	20
Номинальное напряжение сети 110 кВ												
ОПН 110/73/10/400	73	91	400	40	241	153,3	190	195	200	231	246	265
ОПН 110/73/10/400 II	73	91	400	40	285	153,3	190	195	200	231	246	265
ОПН 110/77/10/400	77	96	400	40	241	162	199	204	210	242	258	278
ОПН 110/77/10/400 II	77	96	400	40	285	162	199	204	210	242	258	278
ОПН 110/82/10/400 II	82	102	400	40	285	172	212	217	223	258	275	296
ОПН 110/73/10/550	73	91	550	40	241	204,4	180	185	197	220	239	257
ОПН 110/73/10/550 II	73	91	550	40	285	204,4	180	185	197	220	239	257
ОПН 110/77/10/550	77	96	550	40	241	215,6	190	196	208	233	253	272
ОПН 110/77/10/550 II	77	96	550	40	285	215,6	190	196	208	233	253	272
ОПН 110/86/10/550 II	86	107	550	40	285	240,8	212	218	232	260	282	303
ОПН 110/73/10/800 II	73	91	800	40	285	328,5	–	187	195	221	237	261
ОПН 110/77/10/800 II	77	96	800	40	285	346,5	–	196	205	232	249	274
Номинальное напряжение сети 220 кВ												
ОПН 220/146/10/550	146	182	550	40	482	409	358	369	3094	441	477	514
ОПН 220/146/10/550 II	146	182	550	40	570	409	358	369	3094	441	477	514
ОПН 220/154/10/550	154	192	550	40	482	431	378	3899	416	465	503	542
ОПН 220/154/10/550 II	154	192	550	40	570	431	378	3899	416	465	503	542
ОПН 220/165/10/550 II	165	206	550	40	570	462	404	416	445	487	538	579
ОПН 220/146/10/800 II	146	182	800	40	570	657	–	371	388	439	471	517
ОПН 220/154/10/800 II	154	192	800	40	570	693	–	391	409	463	497	546
Номинальное напряжение сети 330 кВ												
ОПН 330/210/10/800	210	262	800	40	906	945	538	562	575	–	637	684
ОПН 330/220/10/800	220	275	800	40	906	990	563	589	601	–	667	716
ОПН 330/230/10/800	230	287	800	40	906	1035	587	614	628	–	696	747
ОПН 330/210/20/1400	210	262	1400	40	906	1617	500	525	547	–	621	681
ОПН 330/220/20/1400	220	275	1400	40	906	1694	523	549	572	–	650	713
ОПН 330/230/20/1400	230	287	1400	40	906	1771	546	574	598	–	678	744

Таблица П9. **Основные характеристики ОПН производства ЗАО «Завод энергозащитных устройств» для применения в электрических сетях 110÷220 кВ**

Тип ОПН	$U_{про}$, кВ	$U_{н}$, кВ	$W_{опн}$, кДж	$U_{остк}$, кВ при токах, А			$U_{остт}$, кВ при токах, кА		
				500	1000	2000	5	10	20
ОПН–П/110/70/10/400(550)	70	87,5	147 (293)	168	174	185	207	220	232
ОПН–П/110/73/10/400(550)	73	91,3	153,3 (211,7)	175	182	193	216	229	242
ОПН–П/110/77/10/400(550)	77	96,3	161,7 (223,3)	184	192	204	228	242	256
ОПН–П/110/78/10/400(550)	78	97,5	163,8 (226,2)	187	195	207	231	245	259
ОПН–П/110/80/10/400(550)	80	100	168 (232)	194	201	213	239	252	267
ОПН–П/110/82/10/400(550)	82	102,5	172,2 (237,8)	198	206	218	245	262	274
ОПН–П/110/70/10/400(550)	70	87,5	147 (293)	168	174	185	207	220	232

Окончание табл. П9

Тип ОПН	$U_{нро}$, кВ	$U_{н}$, кВ	$W_{опн}$, кДж	$U_{остк}$, кВ при токах, А			$U_{остт}$, кВ при токах, кА		
				500	1000	2000	5	10	20
ОПН–П/110/73/10/400(550)	73	91,3	153,3 (211,7)	175	182	193	216	229	242
ОПН–П/110/77/10/400(550)	77	96,3	161,7 (223,3)	184	192	204	228	242	256
ОПН–П/110/78/10/400(550)	78	97,5	163,8 (226,2)	187	195	207	231	245	259
ОПН–П/110/80/10/400(550)	80	100	168 (232)	194	201	213	239	252	267
ОПН–П/110/82/10/400(550)	82	102,5	172,2 (237,8)	198	206	218	245	262	274
ОПН–П/110/83/10/400(550)	83	103,8	174,3 (240,7)	201	209	221	248	262	277
ОПН–П/110/84/10/400(550)	84	105	176,4 (243,6)	203	211	224	251	265	280
ОПН–П/110/86/10/400(550)	86	107,5	180,6 (249,4)	209	218	231	258	274	290
ОПН–П/110/88/10/400(550)	88	110	184,8 (255,2)	214	223	236	264	280	296
ОПН–П/110/95/10/400(550)	95	119,7	199,5 (275,5)	231	241	255	285	302	319
ОПН–П/110/100/10/400(550)	100	125	210 (290)	243	253	268	300	318	336
ОПНН–П/110/44/10/550	44	55	127,6	112	116	123	138	146	155
ОПНН–П/110/56/10/550	56	70	162,4	142	148	157	176	186	197
ОПНН–П/110/59/10/550	59	73,8	171,1	150	156	165	185	195	207
ОПНН–П/110/60/10/550	60	75	174	152	158	168	188	199	211
ОПН–П/220/146/10/550	146	182,5	423,4	350	365	386	432	457	483
ОПН–П/220/152/10/550	152	190	440,8	354	369	390	440	467	494
ОПН–П/220/154/10/550	154	192,5	446,7	370	386	408	456	484	511
ОПН–П/220/156/10/550	156	195	452,4	375	390	413	462	490	518
ОПН–П/220/163/10/550	163	204	472,7	394	410	435	486	515	545
ОПН–П/220/165/10/550	165	206	478,5	398	415	440	492	522	552
ОПН–П/220/166/10/550	166	207,5	481,4	401	418	443	495	525	555
ОПН–П/220/168/10/550	168	210	487,2	405	423	448	501	531	562
ОПН–П/220/172/10/550	172	215	498,8	418	463	471	506	536	567
ОПН–П/220/176/10/550	176	220	510,4	428	446	472	518	549	580

Примечания:

1) В скобках указаны значение тока пропускной способности I_{2000}=550 А и соответствующее ему значение энергоемкости ОПН.

2) Значение длины пути утечки $L_{у}$ для ОПН 110 кВ с $U_{нро}$=44÷60 кВ составляет 280 см, а для $U_{нро}$=70÷100 кВ – 395 см; для ОПН 220 кВ $L_{у}$=790 см.

3) Ток срабатывания противовзрывного устройства 40 кА.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3
1. Выбор ОПН для защиты оборудования подстанций 110 кВ и выше 4
1.1. Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН 4
1.2. Выбор класса энергоемкости ОПН 5
1.3. Проверка на соответствие характеристики «напряжение – время» выбранного ОПН квазиустановившимся перенапряжениям 6
1.4. Определение защитного уровня ОПН при коммутационных перенапряжениях 9
1.5. Определение защитного уровня ОПН при грозовых перенапряжениях 10
1.6. Пример выбора ОПН 12
2. Квазиустановившиеся перенапряжения и их расчет 16
2.1. Расчет вынужденных напряжений переходного процесса перенапряжений частоты 50 Гц в симметричном режиме 16
2.2. Расчет вынужденных напряжений частоты 50 Гц в несимметричном режиме при однополюсном коротком замыкании 23
2.3. Расчет вынужденных напряжений частоты 50 Гц в несимметричном режиме при успешном ОАПВ 25
2.4. Расчет квазиустановившихся перенапряжений при неполнофазных режимах 30
2.5. Переходный феррорезонанс и определение возможности его возникновения 36
3. Расчет ожидаемого срока службы нелинейных ограничителей перенапряжений 110÷750 кВ 41
3.1. Исходные положения 41
3.2. Статистические распределения неограниченных перенапряжений в точке установки ОПН 44
3.3. Расчет статистического распределения ресурса, расходуемого ОПН в течение года 47
3.4. Определение ожидаемого срока службы ОПН 48
3.5. Пример расчета ожидаемого срока службы ОПН 49
Библиографический список 60
Приложение 61