

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров
по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ»
Кафедра «Метрология и Энергетика»

Паперный Л.Е., Алейникова М.В.

Область применения, выбор и расчет ОПН, установленных в сети 0,4-750кВ

Учебно-методическое пособие для слушателей курсов повышения квалификации энергетиков и студентов энергетического факультета БНТУ

Электронный учебный материал

УДК
ББК
Д

Авторы:

Паперный Л.Е., Алейникова М.В.

Рецензент:

Романенков В.Е., кандидат технических наук,
доцент, ведущий научный сотрудник кафедры
«Новые материалы и технологии» ИПК и ПК БНТУ

Учебно-методическое пособие предназначено для курсов повышения квалификации в ИПК и ПК БНТУ и может быть использовано специалистами предприятий ГПО «Белэнерго» и студентами энергетического факультета БНТУ.

Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. 2964732
E-mail: rectorat@ipk.by
Регистрационный номер № БНТУ/ИПКиПК-17.2015

© БНТУ, 2015

Содержание

Введение.....	4
1. Термины и определения	5
2. Основные технические параметры ОПН.....	8
3. Перенапряжения в электрических сетях.....	10
4. Принцип действия ОПН	16
5. Конструкция ОПН.....	19
6. Выбор характеристик ОПН в общем случае	21
7. Методика выбора основных параметров ОПН для сети 6-35 кВ.....	28
8. Выбор ОПН для защиты от грозовых перенапряжений.	35
9. Выбор параметров ОПН для защиты сети, работающей с нейтралью, заземленной через резистор.	36
10. Выбор параметров ОПН для защиты от перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями.....	36
11. Типовые и особые случаи применения ОПН 6-35 кВ	39
12. Повышение надежности ОПН в сетях 6-35 кВ	43
13. Выбор ОПН в сети 0,4 кВ.....	44
14. Защитные расстояния ОПН.....	45
15. Выбор характеристик ОПН 110-750 кВ в типовых случаях.....	46
16. Выбор характеристик ОПН 110-750 кВ в особых случаях.....	60
17. Защита от грозовых перенапряжений изоляции ВЛ 110-750 кВ.....	63
18. Защита от перенапряжений КРУЭ 110-750 кВ	65
19. Мультиградиентный ОПН.....	68
20. Защита от перенапряжений изоляции « экран-земля» однофазных кабелей высокого напряжения	69
21. Схемно – режимные мероприятия по повышению надежности работы ОПН	71
22. Типовые и особые случаи применения ОПН 110-750 кВ	71
23. Примеры применения ОПН	73
24. Эксплуатация ОПН	76
25. Модифицированные ОПН	78
26. Координация импульсной прочности изоляции подстанционного оборудования с защитными характеристиками ОПН	81
Список используемой литературы	95
Приложение 1	96
Приложение 2	97
Приложение 3	98
Приложение 4	100

Введение

В настоящее время, когда большинство вентильных разрядников (РВ), находящихся в эксплуатации в энергосистеме Республики Беларусь, выработало свой ресурс, а их выпуск практически прекращен, особенно актуальным является вопрос замены разрядников на ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН). Кроме того, большая потребность в ОПН имеется не только на действующих объектах, но и на строящихся.

Применяемые еще в настоящее время РВ с резисторами на основе карбида кремния вследствие недостаточной нелинейности материала, не позволяют обеспечить достаточное ограничение перенапряжений. Более глубокое их снижение требует уменьшения нелинейного последовательного сопротивления, что приводит к существенному увеличению сопровождающих токов. Искровые промежутки РВ не в состоянии погасить эти токи.

Значительное улучшение защитных характеристик разрядников достигается отказом от применения искровых промежутков и при переходе к резисторам с резко нелинейной вольтамперной характеристикой и достаточной пропускной способностью.

Таким требованиям отвечают варисторы из полупроводниковых материалов на базе окиси цинка.

В Республики Беларусь отсутствуют руководящие документы по выбору, расчету, эксплуатации ОПН.

В России имеется стандарт на производство ОПН и РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений, в котором не разобран принцип работы, выбора и расчета ОПН.

В предлагаемой работе обобщен опыт применения, расчета, выбора и эксплуатации ОПН в сетях с глухозаземленной, изолированной и заземленной через резистор нейтрали в энергосистемах Республики Беларусь и России.

Настоящая работа может быть использована инженерно-техническим персоналом энергосистемы и проектных институтов в своей производственной деятельности. Кроме того, работа может быть использована в качестве методической литературы при переподготовке персонала соответствующих специальностей.

1. Термины и определения

Ограничитель перенапряжений нелинейный ОПН. Аппарат, предназначенный для защиты изоляции электрооборудования от грозовых коммутационных перенапряжений, представляющий собой последовательно и/или параллельно соединенные металлоксидные варисторы без последовательных и параллельных искровых промежутков, заключенные в изоляционный корпус.

Металлоксидный варистор. Единичный комплектующий элемент ОПН, имеющий нелинейную вольтамперную характеристику.

Элемент ОПН. Полностью заключенная в корпус часть ОПН, которая может быть соединена последовательно и/или параллельно с другими элементами ОПН для выполнения конструкции ОПН на более высокое наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение и/или ток.

Экранное кольцо ОПН. Часть ОПН, предназначенная для изменения распределения напряженности электрического поля в определенной части пространства.

Противовзрывное устройство (устройство для сброса давления). Устройство, обеспечивающее снижение внутреннего давления в ограничителе при возникновении в нем внутреннего повреждения и предотвращающее взрывное разрушение корпуса ОПН или его разрушение с разлетом осколков за нормируемую зону.

Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН $U_{пр}$. Наибольшее действующее значение напряжения промышленной частоты, которое может быть приложено непрерывно к ОПН в течение всего срока его службы и не приводит к повреждению или термической неустойчивости ОПН при нормированных воздействиях.

Номинальное напряжение U_n . Действующее значение напряжения промышленной частоты, которое ограничитель может выдерживать в течение 10 св процессе рабочих испытаний. Номинальное напряжение должно быть не менее 1,25 наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения.

Импульс. Униполярная волна напряжения или тока, возрастающая без заметных колебаний с большой скоростью до максимального значения и уменьшающаяся, обычно с меньшей скоростью, до нуля с небольшими, если это будет иметь место, переходами в противоположную полярность.

Параметрами, определяющими импульсы напряжения или тока, являются полярность, максимальное значение (амплитуда), условная длительность фронта и условная длительность импульса.

Условное начало импульса. Точка на графике зависимости мгновенного

значения напряжения/тока от времени, определяемая пересечением оси времени при нулевом напряжении или токе и прямой, проходящей через две контрольные точки на фронте импульса. Для импульсов тока контрольные точки должны составлять 10 % и 90 % максимального (амплитудного) значения.

Условное время (длительность) фронта импульса T_1 Время, выраженное в микросекундах и определяемое умножением на 1,25 времени в микросекундах, необходимого для увеличения максимального (амплитудного) значения импульса от 10 % до 90 %.

Примечание - Если имеются колебания на фронте, опорные точки в 10 % и 90 % должны быть взяты на усредненной для колебаний кривой.

Условная длительность импульса T_2 . Время, выраженное в микросекундах, между условным началом импульса и моментом, когда напряжение или ток уменьшаются до половины максимального значения.

Обозначение формы импульса: Комбинация двух чисел в микросекундах, первое из которых обозначает длительность фронта T_1 , а второе - длительность импульса T_2 . Эта комбинация записывается: T_1 / T_2 (знак «/» не имеет математического значения).

Импульс тока большой длительности (прямоугольный импульс). Прямоугольный импульс, который быстро возрастает до максимального значения, остается практически постоянным в течение некоторого периода времени, а затем быстро падает до нуля. Параметрами, определяющими прямоугольный импульс, являются полярность, максимальное (амплитудное) значение и длительность.

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

Условная длительность максимального значения (амплитуды) прямоугольного импульса. Время, в течение которого мгновенное значение импульса больше 90 % его максимального (амплитудного) значения.

Разрядный ток ОПН. Импульс тока, который течет через ОПН.

Крутой импульс тока ОПН: Импульс разрядного тока с условной длительностью фронта 1 мкс (измеренные значения должны находиться в пределах от 0,9 до 1,1 мкс) и условной длительностью до полуспада не более 20 мкс.

Грозовой импульс тока ОПН. Импульс разрядного тока 8/20 мксдлительности фронта импульса в диапазоне от 1 до 9 мкс и длительности импульса в диапазоне от 18 до 22 мкс.

Номинальный разрядный ток ОПН $I_{н}$. Максимальное (амплитудное) значение грозового импульса тока 8/20 мкс, используемое для классификации ОПН.

Импульс большого тока ОПН: Максимальное (амплитудное) значение разрядного тока, имеющего форму импульса 4/10 мкс, который используется для проверки устойчивости ограничителя к прямым разрядам молнии.

Коммутационный импульс тока ОПН: Максимальное (амплитудное) значение тока с условной длительностью фронта не менее 30, но не более 100 мкс и условной длительностью импульса, равной удвоенному времени условного фронта импульса.

Классификационный ток ОПН $I_{кл}$. Амплитудное значение (более высокое амплитудное значение из двух полярностей, если ток асимметричен) активной составляющей тока промышленной частоты, которое используется для определения классификационного напряжения ОПН и нормируется изготовителем.

Классификационное напряжение ОПН $U_{кл}$. Максимальное (амплитудное) значение напряжения промышленной частоты, деленное на $\sqrt{2}$, которое должно быть приложено к ОПН для получения классификационного тока. Классификационное напряжение многоэлементного ОПН определяется как сумма классификационных напряжений отдельных элементов.

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

Остающееся напряжение ОПН $U_{ост}$: Максимальное значение напряжения на ограничителе при протекании через него импульсного тока с данной амплитудой и формой импульса.

Характеристика «напряжение-время». Выдерживаемое напряжение промышленной частоты в зависимости от времени его приложения к ОПН. Показывает максимальный промежуток времени, в течение которого к ОПН может быть приложено напряжение промышленной частоты, превышающее $U_{пр}$, не вызывая повреждения или термической неустойчивости.

Удельная энергия. Рассеиваемая ограничителем энергия, полученная им при приложении одного импульса тока пропускной способности, отнесенная к величине наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения.

Термическая неустойчивость ОПН. Состояние, при котором выделяющаяся в ОПН мощность превышает его способность рассеивания тепла, что

приводит к росту температуры ограничителя, потере его тепловой стабильности и разрушению.

Завершенный разряд. Явление, связанное с повреждением изоляции при электрическом воздействии, которое характеризуется резким падением напряжения и прохождением тока.

Перекрытие. Завершенный разряд по поверхности твердого диэлектрика.

Квазистационарные (временные) перенапряжения. U_y кВ действующее, промышленной или близкой к ней частоты, а также перенапряжения на верхних и нижних гармониках, не затухающие или слабо затухающие, возникающие как следствие коммутации элементов сети (например, замыкание на землю, обрывы провода) и ликвидирующиеся действием релейной защиты или эксплуатационного персонала. Возникновение, величина этих перенапряжений определяется сочетанием параметров сети.

2. Основные технические параметры ОПН

ОПН подразделяют на группы:

- по величине номинального разрядного тока (5000А, 10000А, 20000А);
- по пропускной способности на прямоугольном токе длительностью 2000 мкс с указанием удельной энергии этого импульса, отнесенной к наибольшему длительно допустимому рабочему напряжению.

Классы по пропускной способности и удельные энергии приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Классы пропускной способности ОПН

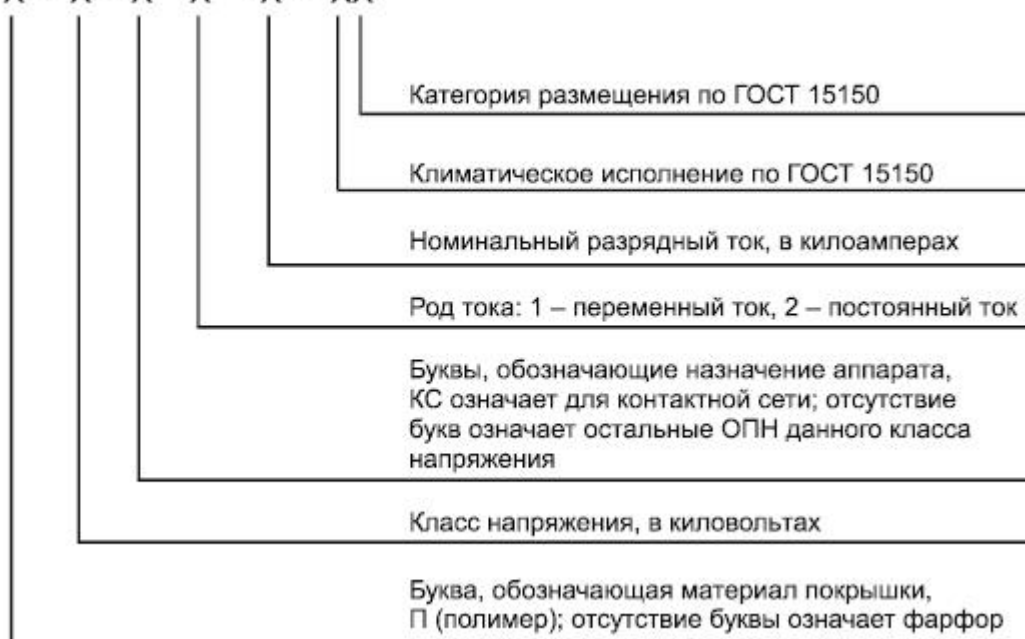
Класс пропускной способности	Пропускная способность	Удельная энергия, кДж/кВ, не менее
1	от 250 до 400 вкл	1
2	от 401 до 750 вкл	2
3	от 751 до 1100 вкл	3,2
4	от 1101 до 1600 вкл	4,5
5	свыше 1600 вкл	7,1

К основным параметрам ОПН относятся:

- наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение $U_{нр}$;
- номинальный рабочий ток I_n ;
- остающееся напряжение при нормированных токах;
- пропускная способность;
- удельная энергия на 1 кВ наибольшего допустимого рабочего напряжения.

Структура условного обозначения

ОПН – X – X – X – X – X – XX



Остающиеся напряжения на ОПН указываются изготовителем в паспорте ОПН при импульсах токов 30/60 мкс, 8/20 мкс и 1/10 мкс с максимальными значениями импульсов, указанными в таблице 2.

Таблица 2 - Нормируемые максимальные значения импульсов токов через ОПН.

Класс ограничителя по пропускной способности	Номинальный разрядный ток, А	Максимальные значения токов при импульсах, мкс		
		30/60	8/20	1/10
1	5000	125,250,500	2500,5000,10000	5000
	10000	125,250,500	5000,10000,20000	10000
2	10000	250,500,10000	5000,10000,20000	10000
3	10000	500,1000,2000	5000,10000,20000	10000
4	10000	500,1000,2000	5000,10000,20000	10000
	20000	500,1000,2000	10000,20000,40000	20000
5	20000	500,1000,2000	10000,20000,40000	20000

Длина пути утечки изоляции ОПН, работающего в условиях степени загрязнения I должна быть не ниже 1,8 см/кВ наибольшего рабочего напряжения сети, а при степени загрязнения II, III, IV – не ниже 2,0; 2,5; 3,1 см/кВ соответственно.

Изоляция корпуса должна выдерживать испытания напряжением грозового импульса, коммутационного импульса, одноминутного напряжения промышленной частоты.

При выборе ОПН должны быть учтены следующие характеристики:

1. Сети, в которой установлены ОПН:

- класс напряжения сети;
- максимальное напряжение сети;
- способ заземления нейтрали.

2. Характеристики РПН, от которых зависит его надежная работа в сети под рабочим напряжением и при воздействии квазистационарных перенапряжений:

- наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН;
- номинальное напряжение ОПН;
- характеристика «напряжение - время».

3. Характеристики ОПН, от которых зависит защищенность оборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений:

- остающееся напряжение;
- грозовой импульс тока формы 8/20 мкс;
- коммутационный импульс тока формы 30/60 мкс;
- крутой импульс тока формы 1/10 мкс (используется при большой скорости нарастания протекающего в нем тока).

4. Характеристики ОПН, от которых зависит его надежная работа при ограничении грозовых и коммутационных перенапряжений:

- номинальный разрядный ток характеризует свойства ОПН при грозовых перенапряжениях;
- импульс большого тока с формой импульса 4/10 используется для оценки устойчивости ОПН к прямым ударам молнии;
- ток пропускной способности (импульс тока большей длительности) характеризует способность ОПН рассеивать энергию коммутационных перенапряжений;
- рассеиваемая (поглощенная) энергия (термическая неустойчивость ОПН);
- удельная рассеиваемая (поглощаемая) энергия, определяющая класс пропускной способности.

3. Перенапряжения в электрических сетях

В нормальном режиме напряжение на изоляции оборудования не должно повышаться сверх наибольшего рабочего напряжения. Всякое превышение мгновенным значением напряжения на изоляции амплитуды наибольшего рабочего напряжения принято называть перенапряжением. В большинстве случаев перенапряжения имеют кратковременный характер, так как они

возникают при быстро затухающих переходных процессах или в аварийных режимах, время существования которых ограничивается действием релейной защиты и системной автоматики. Различные виды перенапряжений имеют длительность от единиц микросекунд до нескольких часов. Даже самые кратковременные перенапряжения способны привести к пробоем или перекрытию изоляции и связанной с этим необходимостью последующего отключения поврежденного элемента сети, т.е. к перерывам в электроснабжении потребителей или снижением качества электроэнергии.

В зависимости от места возникновения можно выделить различные типы перенапряжений. Наибольшее практическое значение имеют перенапряжения на фазах относительно земли. Они воздействуют на изоляцию, отделяющую токоведущие части электрооборудования от земли и заземленных конструкций.

В зависимости от причин возникновения различают две группы перенапряжений внешние и внутренние. Внешние перенапряжения являются следствием воздействия внешних по отношению к рассматриваемой сети источников энергии (например, при ударах молнии). Внутренние перенапряжения развиваются за счет процессов, обусловленных функционированием электрической сети, имеют место при неблагоприятной конфигурации сети, а также вследствие работы коммутационных аппаратов или повреждений изоляции.

Внешние перенапряжения

Главным источником внешних перенапряжений в высоковольтных электрических сетях являются разряды молнии.

Наиболее опасные грозовые перенапряжения возникают при прямом ударе молнии в токоведущие элементы электрической сети (в фазные провода воздушных линий, в ошиновку распределительных устройств (РУ) станций и подстанций).

Удар молнии в заземленные элементы конструкции (в заземленные грозозащитные тросы, заземленные опоры воздушных линий, в молниеотводы, установленные в распределительном устройстве) приводит к возникновению на них кратковременных перенапряжений, которые могут стать причиной обратных перекрытий с заземленных элементов на токоведущие.

При ударе молнии вблизи от воздушной линии или распределительного устройства возникают индуктированные перенапряжения, обусловленные взаимной электромагнитной (индуктивной и емкостной) связью канала молнии с токоведущими и заземленными элементами сети. Они в большинстве случаев

имеют меньшую величину, чем перенапряжения от прямого удара молнии, но представляют опасность для изоляции оборудования сетей с номинальным напряжением до 110 кВ включительно.

Импульсы грозовых перенапряжений могут также воздействовать на изоляцию электроустановок, расположенных на значительном удалении от мест удара молнии, так как грозовые волны распространяются по линиям электропередач на значительные расстояния с малым затуханием.

Набегающие по воздушным линиям на распределительные устройства грозовые волны могут представлять опасность для электрооборудования станций и подстанций, которое имеет меньшие запасы электрической прочности по сравнению с линейной изоляцией.

Грозовые перенапряжения могут передаваться через трансформатор в его нейтраль и на вторичную сторону как магнитным (по коэффициенту трансформации), так и электростатическим путем (через межобмоточные емкости). Учитывая оба механизма, грозовые перенапряжения представляют опасность и для изоляции разземляемой нейтрали трансформатора, и для изоляции вторичной обмотки трансформатора, а также оборудования к ней присоединенного.

Внутренние перенапряжения

Внутренние перенапряжения в зависимости от длительности воздействия на изоляцию подразделяются на квазистационарные и коммутационные. Внутренние перенапряжения зависят от многих факторов, в частности - от способа заземления нейтрали сети.

Способ заземления нейтрали определяется различными соображениями, но, как правило, используется:

в сетях 6-35 кВ

- изолированная нейтраль;
- нейтраль, заземленная через дугогасящий реактор (ДГР);
- нейтраль, заземленная через резистор;
- нейтраль, заземленная через параллельно включенные ДГР и резистор;

в сетях 110-220 кВ

- эффективно заземленная нейтраль; в сетях 110-220 кВ и 330-750 кВ
- глухо заземленная нейтраль.

Сети 110-220 кВ с эффективно заземленной нейтралью - это сети, в которых выполнено частичное разземление нейтралей 110-220 кВ силовых трансформаторов, позволяющее ограничить токи однофазного короткого замыкания (наиболее частый вид короткого замыкания), а также в ряде случаев необходимое по условиям работы релейной защиты.

Квазистационарные перенапряжения

Квазистационарные перенапряжения возникают при временных с точки зрения эксплуатации режимах работы и неблагоприятных сочетаниях параметров сети и могут продолжаться до тех пор, пока не изменится схема или режим сети. Длительность таких перенапряжений (от секунд до десятков минут) ограничивается действием релейной защиты или оперативного персонала.

Квазистационарные перенапряжения условно делят на режимные, резонансные, феррорезонансные.

Режимные перенапряжения наблюдаются при неблагоприятных сочетаниях, действующих в сети электродвижущих сил. К ним можно отнести перенапряжения при несимметричном коротком замыкании (или просто замыкании) на землю, а также при перевозбуждении и разгоне генератора, которые возникают в случае внезапного сброса нагрузки.

Резонансные перенапряжения имеют место при приближении одной из собственных частот колебаний отдельных участков сети к частоте вынуждающей э.д. с (как правило, частота 50 Гц). Они развиваются в контурах, содержащих емкость и ненасыщенную индуктивность - например, при одностороннем питании линии электропередачи 110-750 кВ большой протяженности; в неполнофазных режимах воздушной линии 500-750 кВ с присоединенными к ней шунтирующими реакторами, в сетях 6-35 кВ при недокомпенсации индуктивностью ДГР емкости сети.

Феррорезонансные перенапряжения могут развиваться в контурах, содержащих емкость и индуктивность с насыщенным магнитопроводом. Такие перенапряжения наблюдаются как на промышленной частоте, так и на высших и низших гармониках.

Нередко феррорезонансные процессы имеют место при неполнофазном питании силовых трансформаторов, которое может быть вызвано: перегоранием плавких вставок высоковольтных предохранителей в одной или двух фазах, неполнофазными коммутациями разъединителей или выключателей, обрывами проводов (или шлейфов на опорах) воздушных линий. Этот вид перенапряжений представляет опасность для всего оборудования сети, а наибольшую опасность - для ОПН.

Возникновение феррорезонансных процессов возможно и в схемах с измерительными трансформаторами напряжения (ТН) электромагнитного типа. Этот вид перенапряжений представляет опасность, главным образом, только для электромагнитных трансформаторов напряжения. В качестве примера можно привести феррорезонанс на сборных шинах РУ 10-750 кВ с электромагнитными ТН и воздушными выключателями, шунтированными емкостными дели-

телями напряжения при включении холостых шин с ТН феррорезонансно неустойчивыми (НТМИ, НКФ, ЗНОМ, ЗНОЛП).

Коммутационные перенапряжения

Коммутационные перенапряжения возникают при всевозможных быстрых изменениях режимов работы сети. Они происходят вследствие работы коммутационных аппаратов (включение и отключение элементов сети), пробоях изоляции, а также при резком изменении параметров нелинейных элементов. Наибольшее значение среди них имеют перенапряжения при коммутациях воздушных линий электропередачи, кабелей, двигателей, индуктивных элементов сети (трансформаторов, реакторов), конденсаторных батарей.

Особенности внутренних перенапряжений в сетях 6-35 кВ

Существующие способы заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ определили ряд особенностей внутренних перенапряжений в них.

1. Резонансные перенапряжения.

Возникновение этого вида перенапряжений возможно в сетях 6-35 кВ с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор, при несимметрии в сети, которая может быть вызвана:

- естественным отличием по фазам параметров воздушных и кабельных линий 6-35 кВ;
- неполнофазным включением одного из присоединений, например, в процессе коммутации из-за неодновременности замыкания контактов выключателя или отказа в действии одной или двух его фаз;
- обрывом проводов, перегоранием плавких вставок предохранителей.

Резонансные перенапряжения принципиально могут развиваться лишь в случае недокомпенсации индуктивностью ДГР емкости сети и, в случае своего возникновения, приводят к резонансному смещению нейтрали, т.е. охватывают всю сеть.

2. Феррорезонансные перенапряжения.

В сетях 6-35 кВ феррорезонансные перенапряжения могут быть вызваны неполнофазными включениями силовых трансформаторов. При этом в ряде случаев феррорезонансные перенапряжения возникают и на нейтрали источника, охватывая, таким образом, всю сеть.

Измерительные трансформаторы напряжения имеются практически на каждой секции 6-35 кВ. Для целей измерения и контроля изоляции первичные обмотки трансформаторов напряжения присоединяются между фазой и землей, поэтому параллельно емкости сети на землю оказывается включенной нели-

нейная индуктивность каждой фазы ТН. Это создает схему, в которой потенциально могут существовать феррорезонансные колебания, которые определяются параметрами схемы и числом трансформаторов напряжения на фазу. В сетях с изолированной нейтралью такие феррорезонансные колебания являются причиной перенапряжений, которые могут возникать при симметрии схемы за счет смещения нейтрали, вызванного насыщением стали трансформаторов напряжения в том или ином переходном процессе. Примерами таких переходных процессов могут служить отключение устойчивого однофазного замыкания на землю или перемежающееся неустойчивое замыкание на землю.

3. Дуговые перенапряжения.

подавляющее большинство нарушений нормальной работы сетей с изолированной нейтралью связано с повреждением изоляции относительно земли, т.е. связано с однофазным замыканием на землю (033). Однофазные замыкания в сети, особенно при малых токах, редко переходят в устойчивые однофазные повреждения. Дуговой процесс замыкания, как правило, приобретает неустойчивый характер, при котором имеют место многократные гашения и зажигания заземляющей дуги. Как следствие, в сети возникают значительные перенапряжения, которые сами по себе или при их наложении на переходные процессы другого вида (например, коммутационные перенапряжения) могут быть опасными.

По причине возникновения дуговые перенапряжения являются внутренними перенапряжениями, однако однозначно отнести их к квазистационарным или коммутационным перенапряжениям не представляется возможным: по длительности существования эти перенапряжения относятся к квазистационарным, так как могут существовать до нескольких часов, а по причине возникновения - к коммутационным, так как вызваны изменением схемы сети. Поэтому дуговые перенапряжения традиционно выделяются отдельно.

Как правило, кратность дуговых перенапряжений не превышает величины 3,0-3,5 (по отношению к амплитуде фазного напряжения сети). Опасность дуговых перенапряжений определяется не столько их величиной, сколько длительностью их существования и тем, что они охватывают всю сеть.

Длительность существования 033 нормируется правилами технической эксплуатации электроустановок (ПТЭ) в зависимости от вида электрических сетей и составляет:

– в контролируемых сетях, питаемых от турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, а также с присоединенными мощными электродвигателями, с токами однофазного замыкания на землю в генераторной цепи более 5 А - не более 0,5 сек; при токе однофазного замыкания на зем-

лю ниже 5 А - 2 часа и может быть увеличено до 6 часов, если однофазное замыкание находится вне обмоток;

- в кабельных сетях 6-35 кВ, не содержащих присоединенных турбогенераторов, синхронных компенсаторов и мощных электродвигателей - 2 часа и может быть допущено увеличение до 6 часов по согласованию с энергоснабжающей организацией;

- в воздушных сетях, работающих с изолированной нейтралью или компенсацией емкостного тока замыкания на землю и не содержащих электростанций и присоединений с электродвигателями, время отключения однофазного замыкания на землю не нормируется.

4. Принцип действия ОПН

Основными защитными аппаратами (ЗА) для защиты изоляции от грозовых и коммутационных перенапряжений являются вентильные разрядники и нелинейные ограничители перенапряжений. При построении схем защиты от перенапряжений оборудования РУ с помощью ОПН и РВ необходимо решать две основные тесно связанные друг с другом задачи:

- выбор числа, мест установки и характеристик ЗА, которые обеспечат надежную защиту изоляции от грозовых и коммутационных перенапряжений;

- обеспечение надежной работы самих ЗА при воздействии на них рабочего напряжения сети, а также при воздействии квазистационарных перенапряжений, для ограничения которых ЗА не предназначены.

Защитные свойства РВ и ОПН основаны на нелинейности вольтамперной характеристики их рабочих элементов, обеспечивающей заметное снижение сопротивления при повышенных напряжениях и возврат в исходное состояние после снижения напряжения до нормального рабочего. Низкая нелинейность вольтамперной характеристики рабочих элементов в разрядниках не позволяла обеспечить одновременно и достаточно глубокое ограничение перенапряжений, и малый ток проводимости при воздействии рабочего напряжения. Поэтому в конструкции разрядника были использованы искровые промежутки, включаемые последовательно с нелинейными элементами и позволяющие избежать воздействия на них рабочего напряжения, срабатывающие, однако в случае возникновения перенапряжений, опасных для защищаемого оборудования. Значительно большая нелинейность окисно-цинковых сопротивлений (варисторов) ограничителей перенапряжений ОПН позволила отказаться от использования в их конструкции искровых промежутков, т.е. нелинейные элементы ОПН присоединены к сети в течение всего срока его службы.

В настоящее время вентильные разрядники практически сняты с произ-

водства, а в эксплуатации в большинстве случаев отслужили свой нормативный срок службы. Построение схем защиты изоляции оборудования как новых, так и модернизируемых РУ, от грозовых и коммутационных перенапряжений теперь оказывается возможным только с использованием ОПН.

ОПН не предназначен для ограничения квазистационарных перенапряжений и защиты оборудования от них, так как это потребовало бы неоправданных затрат на параллельные элементы в конструкции ОПН. Поэтому способы ограничения квазистационарных перенапряжений выходят за рамки настоящих Рекомендаций и здесь не рассматриваются.

В нормальном режиме ток через ограничитель имеет емкостной характер и составляет десятые доли миллиампера. При возникновении волн перенапряжения резисторы ОПН переходят в проводящее состояние и ограничивают дальнейшее нарастание перенапряжения до уровня безопасного для изоляции защищаемого оборудования. Когда перенапряжения снижаются, ОПН вновь возвращается в непроводящее состояние (рисунок 1)

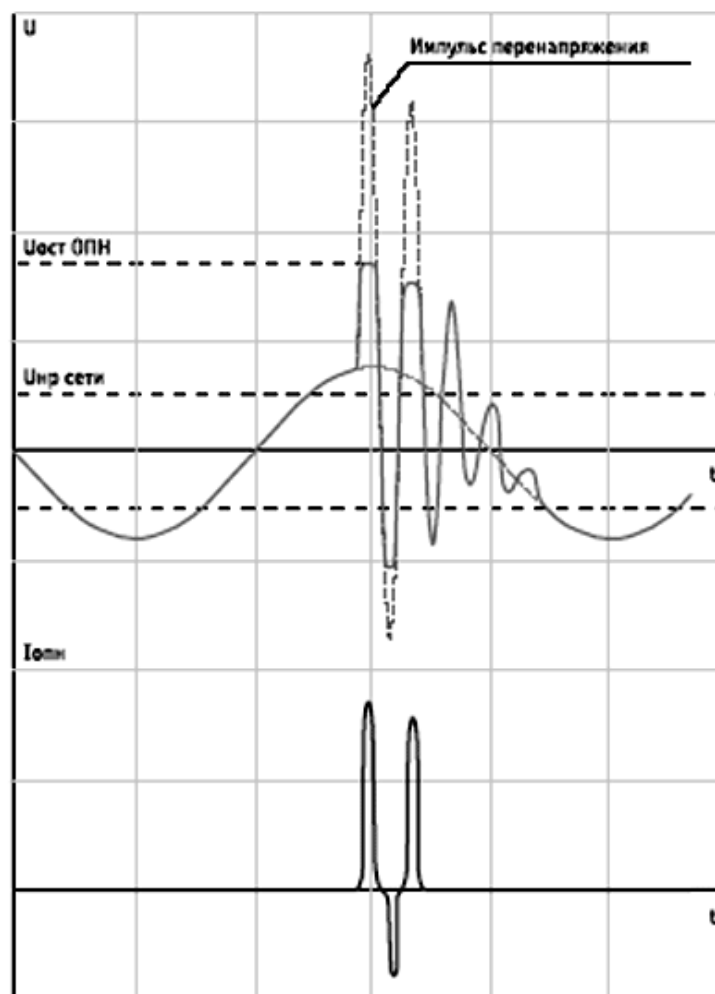


Рисунок 1 - Осциллограмма, характеризующая принцип работы ОПН.

При напряжениях, не превышающих $0,7 U_{100}$ (U_{100} – напряжение на варисторе при импульсном токе 8/20 мкс 100 А) преобладает емкостная составляю-

щая тока, не вызывающая нагрева ОПН. Этому соответствует градиент напряжения 1,0 кВ/см. При больших градиентах напряжения резко возрастает нелинейная проводимость и активная составляющая тока, что приводит к существенному нагреву варисторов. Критическое значение градиента рабочего напряжения 1,0 кВ/см соответствует максимально допустимому току через варистор ~ 1 мА, являющемуся в основном току проводимости.

Пропускная способность ОПН и характер их повреждения зависит от амплитуды и длительности протекания тока через них. При протекании через ОПН импульсов тока большой длительности, характерных для коммутационных перенапряжений наблюдается их существенный нагрев. Амплитуда импульса, приводящая к повреждению варисторов, составляет 80-120 А. В результате такого воздействия, происходит проплавление в варисторах сквозного отверстия. При коротких импульсах тока 8/20 характерных для грозовых перенапряжений, варисторы не разрушаются даже при воздействии импульсов с амплитудой 1000-1500 А.

Дальнейшее увеличение тока приводит к их перекрытию по боковой поверхности, однако ток перекрытий может быть увеличен, если торцевую поверхность варистора покрыть специальным изоляционным лаком или залить варисторы полимерным компаундом.

ОПНы комплектуются из большого числа параллельно и последовательно соединенных в колонку варисторов. Число параллельных колонок в ОПНе определяется номинальным напряжением сети.

Расчетный коммутационный ток берется для коммутации, сопровождающейся наибольшей кратностью и большей длительностью этого тока в сетях 6-35 кВ в зависимости от вида защищаемого электрооборудования и находится в пределах от 200 до 600 А. Причем для ОПН, установленных на шинах (секциях) они несколько больше, чем для ОПН, предназначенных для защиты электрооборудования присоединений.

В СНГ коммутационные токи эквивалентируются волной 1,2/2,5 мкс и 30/60 мкс, в МЭК – 2000 мкс. Импульсные токи в СНГ волной 8/20 мкс, а МЭК – волнами 8/20 и 4/10 мкс.

Энергия, запасенная в приведенных выше волнах тока на 1 кВ напряжения U_{ϕ} , приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Соотношение энергий различных волн тока.

Волна	8/20 мкс 5 кА	8/20 мкс 10 кА	8/20 мкс 20 кА	2000 мкс 300 А	2000 мкс 500 кА	1,2/4,1 мкс 10кА	4/10 мкс 100 кА
Энергия, кДж/кВ U_{ϕ}	0,25	0,5	1,25	2,25	3,25	$\sim 3,25$	3,5

Из таблицы видно, что:

– из реальных воздействий наибольшей энергией обладает прямоугольная волна длительностью 2000 мкс и волна 1,2/2,1 мкс, эквивалентные коммутационным перенапряжениям;

– импульс 4/10 мкс, характеризующий устойчивость ограничителя при прямых ударах молнии, обладает приблизительно той же энергией, что и импульсы, эквивалентирующие коммутационные токи.

Таким образом, при выборе ОПН, с точки зрения энергопоглощения, определяющим является коммутационный импульс.

5. Конструкция ОПН

Ограничитель перенапряжений представляет собой колонку из последовательно соединенных N нелинейных сопротивлений - варисторов, изготавливаемых в виде шайб той или иной высоты h и диаметра D . В ряде случаев ОПН представляет собой несколько колонок варисторов, работающих параллельно. На рисунке 2 приведена схема сборки варисторов.

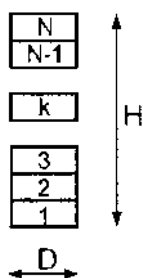


Рисунок 2 – Внешний вид колонки из N последовательно соединенных варисторов.

Испытаниям подвергаются как отдельные элементы конструкции ОПН (варисторы, полимерная или фарфоровая изоляционная крышка), так и полностью собранные ОПН. В процессе испытаний, проводимых на варисторах конкретного производителя, в частности, могут быть определены:

– наибольший допустимый градиент $E_{нр}$ (кВ/см) рабочего напряжения промышленной частоты по высоте варистора;

– допустимая плотность $J_{доп}$ (А/см²) импульсного тока прямоугольной формы длительностью 2000 мкс по поперечному сечению варистора.

Если требуется изготовить ОПН с наибольшим рабочим напряжением $U_{нро}$, то высоту колонки варисторов для такого ОПН можно определить из простого соотношения $H = U_{нро} / E_{нр}$. При сборке следует использовать варисторы той высоты h (из числа типовых значений), которая удовлетворит условию

$$hN \geq U_{нро} / E_{нр} \quad (1)$$

т.е. обеспечит высоту hN колонки из N варисторов (N - целое число) равной или несколько большей, чем требуемая высота H . Видно, что для заданного типа варисторов (высоты h и градиента E_{np}) наибольшее рабочее напряжение ОПН пропорционально числу этих варисторов.

Если требуется изготовить ОПН с током пропускной способности $I_{п}$, то диаметр колонки варисторов для такого ОПН можно определить из простого соотношения

$$I_{п} = p(D/2)^2 J_{доп}, \quad (2)$$

откуда видно, что для заданного типа варисторов (плотности тока $J_{доп}$) ток пропускной способности пропорционален квадрату диаметра варисторов. При сборке следует использовать варисторы такого диаметра (из числа типовых значений), который удовлетворит условию

$$D \geq 2 \sqrt{I_{п} / p J_{доп}} \quad (3)$$

На рисунке 3 представляет чертеж ОПН в разрезе.

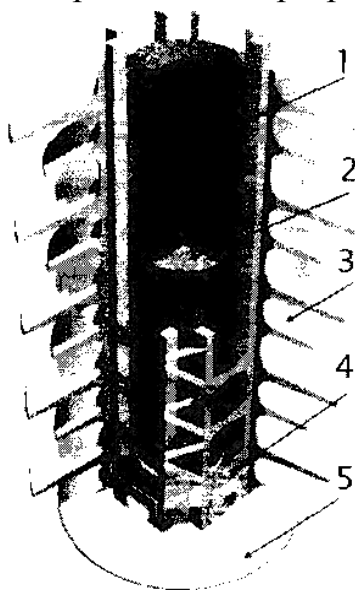


Рисунок 3 – ОПН в разрезе,

1 – усиливающие элементы, 2 – варисторы, 3 – крышка, 4 – защитная лента, 5 - фланец

Если необходимый эквивалентный диаметр D варисторов, обеспечивающий желаемый ток пропускной способности $I_{п}$, оказался больше, чем максимально возможный (из типовых значений диаметра единичного варистора), то необходимо рассмотреть конструкцию ОПН с параллельными колонками варисторов. Диаметр одной колонки варисторов и число параллельных колонок ОПН можно определить из простого соотношения

$$I_{п} = Mp(D/2)^2 J_{доп} \quad (4)$$

Выбор наибольшего рабочего напряжения ОПН и тока пропускной

способности ОПН - это выбор высоты H и диаметра D колонки варисторов. В свою очередь, известные высота и диаметр колонки варисторов практически однозначно определяют все остальные характеристики ОПН.

Для заданной конструкции (производителя) ОПН характеристика «напряжение-время» $K_{н-в}(t)$, построенная в относительных единицах рабочего напряжения ОПН ($U_{нрo}$), определяется главным образом нелинейностью материала варисторов, т.е. практически не зависит от высоты и диаметра колонки варисторов. Следовательно, для заданной конструкции ОПН характеристика «напряжение-время» $U_{н-в}(t)$ ОПН, построенная в именованных единицах, определяется его наибольшим рабочим напряжением.

6. Выбор характеристик ОПН в общем случае

Номинальное напряжение ОПН ($U_{ном}^{опн}$), по сути, является одной из точек зависимости «напряжение-время», соответствующей времени 10 секунд. Поэтому номинальное напряжение ОПН, как и характеристика «напряжение-время», определяется наибольшим рабочим напряжением ОПН.

Остающиеся напряжения на ОПН при грозовых и коммутационных импульсных токах определяются по вольтамперной характеристике ОПН. Вольтамперная характеристика ОПН, построенная в относительных единицах (ток отнесен к диаметру варисторов D , напряжение отнесено к амплитуде наибольшего рабочего напряжения $\sqrt{2}U_{нрo}$), определяется главным образом нелинейностью материала варисторов, т.е. практически не зависит от высоты и диаметра колонки варисторов. С использованием вольтамперной характеристики ОПН, построенной в относительных единицах, можно определить типовые кратности ограничения грозовых ($K_{8/20}$) и коммутационных ($K_{30/60}$) перенапряжений в месте установки ОПН. Для заданного наибольшего рабочего напряжения ОПН эти кратности позволяют оценить остающиеся напряжения на ОПН

$$U_{8/20} = (U_{нрo} / \sqrt{2}K_{8/20}) \quad (5)$$

$$U_{30/60} = (U_{нрo} / \sqrt{2}K_{30/60}) \quad (6)$$

т.е. остающиеся напряжения на ОПН определяются его наибольшим рабочим напряжением. На рисунке 4 приведена вольтамперная характеристика ОПН

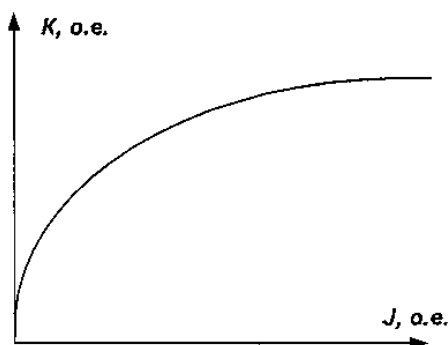


Рисунок 4 – Вольтамперная характеристика ОПН в относительных единицах

Энергия, которая выделится в ОПН при протекании по нему импульса тока I_n прямоугольной формы длительностью DT , определяется выражением

$$W_{DT} = U_{ост} * I_n * DT, \quad (6)$$

где в качестве остающегося напряжения $U_{ост}$ на ОПН можно принять $U_{30/60}$ так как импульс тока прямоугольной формы считается коммутационным импульсом. Тогда выражение для удельной энергии (энергоемкости),

$$W_{DT}/U_{про} = \sqrt{2} K_{30/60} I_n DT, \quad (7)$$

т.е. при заданной длительности прямоугольного импульса $DT = 2000$ мкс удельная энергия ОПН, приведенная к его наибольшему рабочему напряжению, определяется током пропускной способности ОПН.

Значения номинального разрядного тока (импульс 8/20 мкс) и импульса большого тока (импульс 4/10 мкс) оказываются выше для тех ОПН, у которых больше диаметр варисторов, т.е. выше ток пропускной способности I_n .

Таким образом, для заданной конструкции (производителя) ОПН действительно выбор наибольшего рабочего напряжения ОПН и его удельной энергии (тока пропускной способности) практически однозначно определяют остальные параметры ОПН. Иными словами, выбор ОПН сводится к определению его наибольшего рабочего напряжения и энергоемкости с последующей проверкой соответствия прочих характеристик (остающихся напряжений и др.) выбранного типа ОПН конкретным условиям эксплуатации.

Наибольшее рабочее напряжение ОПН ($U_{пр}$):

– определяет надежность работы ОПН под рабочим напряжением сети и при возникновении квазистационарных перенапряжений, для ограничения которых он не предназначен;

– определяет защищенность оборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений.

Выбор наибольшего рабочего напряжения ОПН - это всегда компромисс между защищенностью оборудования от перенапряжений и надежностью работы самого ОПН.

Наибольшее рабочее напряжение ОПН - это одна из точек характеристики «напряжение-время» ОПН, отвечающая «бесконечного большому» (25-30 лет) времени воздействия напряжения. Учитывая это, выбор наибольшего рабочего напряжения ОПН неразрывно связан с выбором

характеристики «напряжение- время» ОПН.

В качестве первого приближения $U_{\text{нро}}$ принимается равным фазному значению наибольшего рабочего напряжения сети, в которую он устанавливается. Таким образом,

$$U_{\text{нро}}^{\text{нач}} = U_{\text{нрс}} / \sqrt{3}, \quad (8)$$

где $U_{\text{нрс}}$ - наибольшее (линейное) рабочее напряжение сети.

Далее на одном графике строятся зависимости «напряжение-время» для ОПН с выбранным значением наибольшего рабочего напряжения $U_{\text{нро}}^{\text{нач}}$, и для сети, в которую этот ОПН устанавливается. Под характеристикой «напряжение- время» сети понимается зависимость действующего значения напряжения промышленной частоты, которое может возникать на изоляции «фаза-земля» в месте предполагаемой установки ОПН, от времени приложения этого напряжения. Как правило, характеристика «напряжение-время» сети представляет собой совокупность нескольких пар точек, определенных с учетом выдержек времени релейной защиты на основе расчетов или опыта эксплуатации, однако на рисунках ниже она представлена как непрерывная кривая.

Если характеристика «напряжение-время» сети хотя бы при одном значении времени оказывается выше по напряжению, чем характеристика «напряжение- время» ОПН, то существует риск повреждения ОПН, и поэтому следует увеличить наибольшее рабочее напряжение ОПН, т.е. пропорционально поднять по напряжению все точки характеристики «напряжение-время» ОПН.

Процедура определения достаточного значения наибольшего рабочего напряжения ОПН отражена на трех рисунках, а общее правило выбора наибольшего рабочего, напряжения ОПН, соответственно, имеет вид

$$U_{\text{н-в}}^{\text{опн}}(T) \geq U_{\text{н-в}}^{\text{сети}}(T) \quad (9)$$

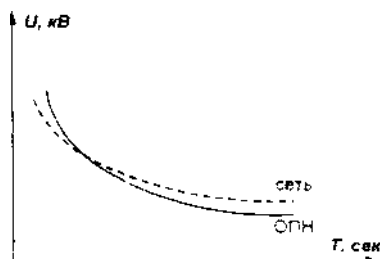
в частности, справедливо

$$U_{\text{нро}} \geq U_{\text{нрс}} / \sqrt{3} \quad (10)$$

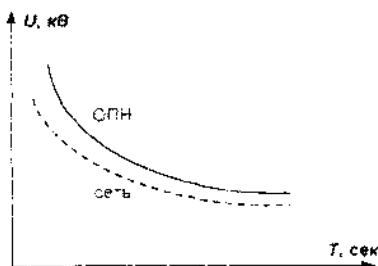
При выборе наибольшего рабочего напряжения ОПН следует принимать во внимание возможность длительного существования в сетевом напряжении высших гармоник. Наличие таких гармоник, наложенных на рабочее напряжение сети, приводит к повышению тока в ОПН и может вызвать недопустимый перегрев варисторов вплоть до их повреждения.

Характеристика «напряжение-время» ОПН определяется на промышленной частоте 50 Гц, а свойства ОПН при наличии в приложенном

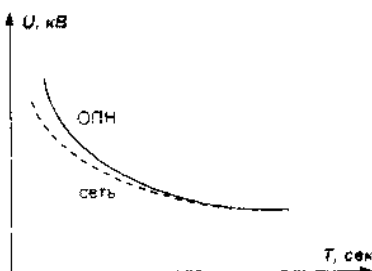
напряжении высшихгармоник изучены плохо. Поэтому выбор наибольшего рабочего напряженияОПН при наличии в сети высших гармоник является сложной задачей, неимеющей в общем случае обоснованного решения. На рисунке 5 представлены вольтамперные характеристики ОПН при разных соотношениях характеристик ОПН.



Характеристики «напряжение-время» для ОПН и сети, в которую он устанавливается, в случае, когда ОПН не соответствует сети.



Характеристики «напряжение-время» для ОПН и сети, в которую он устанавливается, в случае, когда ОПН соответствует сети.



Характеристики «напряжение-время» для ОПН и сети, в которую он устанавливается, в случае, когда ОПН с запасом соответствует сети.

Рисунок 5 - Вольтамперные характеристики ОПН при разных соотношениях характеристик ОПН.

Энергоемкость ОПН

В результате аналитических расчетов или компьютерного моделирования процессов должно быть получено значение максимальной энергии одного импульса $W_{\text{макс}}$, которая может выделиться в ОПН при ограничении коммутационных и (или) грозовых перенапряжений в предполагаемом месте

его установки. Соотношение $W_{\text{макс}}/U_{\text{нро}}$ дает значение требуемой удельной энергии (энергоемкости) ОПН. Выбор энергоемкости $W_{\text{уд}}$ одного импульса тока в ОПН должен проводиться исходя из условия

$$W_{\text{уд}} \geq W_{\text{макс}} / U_{\text{нро}} \quad (11)$$

Выбранный ОПН обладает наибольшим рабочим напряжением $U_{\text{нро}}$ и энергоемкостью $W_{\text{уд}}$, которые практически однозначно определяют все прочие характеристики ОПН конкретного производителя. Прочие характеристики ОПН должны удовлетворять условиям, приведенным ниже.

Остающееся напряжение на ОПН в режиме ограничения коммутационных перенапряжений $U_{30/60}$ должно быть с запасом меньше, чем испытательное напряжение $U_{\text{исп}}^{\text{ком}}$ защищаемого оборудования коммутационными импульсами (см. ГОСТ 1516.3). Рекомендуемый запас составляет не менее 10%, т.е.

$$U_{30/60} \leq 0,9 / U_{\text{исп}}^{\text{ком}} \quad (12)$$

Если это условие не выполняется, то необходимо:

- снизить уровни и (или) длительности воздействия на ОПН со стороны сети квазистационарных перенапряжений, т.е. понизить характеристику «напряжение-время» сети, что позволит соответственно уменьшить наибольшее рабочее напряжение ОПН, а значит и $U_{30/60}$;

- использовать оборудование с изоляцией, обладающей повышенной прочностью, т.е. увеличить $U_{\text{исп}}^{\text{ком}}$.

Остающееся напряжение на ОПН в режиме ограничения грозовых перенапряжений $U_{8/20}$ должно быть таким, чтобы максимальные перенапряжения $U^{\text{гроз}}$ на защищаемом оборудовании были с запасом меньше, чем испытательное напряжение $U_{\text{исп}}^{\text{гроз}}$ этого оборудования грозовыми импульсами (см. ГОСТ 1516.3). Рекомендуемый запас составляет не менее 10%, т.е.

$$U^{\text{гроз}} \leq 0,9 / U_{\text{исп}}^{\text{гроз}} \quad (13)$$

Известно, что чем больше расстояние L от ОПН до защищаемого оборудования и чем меньше длительность фронта $t_{\text{ф}}$ воздействующих грозовых волн, тем значительнее напряжение $U^{\text{гроз}}$ может превосходить напряжение $U_{8/20}$. Если для конкретного расстояния L и остающегося напряжения $U_{8/20}$ условие $U^{\text{гроз}} \leq 0,9 / U_{\text{исп}}^{\text{гроз}}$ не выполняется в достаточном числе случаев воздействия грозовых волн с той или иной длительностью фронта $t_{\text{ф}}$ (не обеспечивается достаточный уровень надежности защиты оборудования от грозовых перенапряжений), то необходимо:

- уменьшить расстояние L от ОПН до защищаемого оборудования;
- ограничить число грозových волн с малой длительностью фронта t_f , что достигается обустройством защищенных тросом подходов воздушных линий (ВЛ) к распределительному устройству и предполагает следующие мероприятия:

- установку на подходах присоединенных к РУ воздушных линий одного или нескольких грозозащитных тросов, обеспечивающих снижение вероятности прямого удара молнии в фазные провода ВЛ;

- выбор оптимального положения тросов на опоре, обеспечивающего минимальную вероятность прорыва молнии на фазные провода;

- снижение сопротивления заземления ближайших к РУ опор присоединенных воздушных линий, что при ударе молнии в заземленный трос линии снижает вероятность обратных перекрытий с тела опоры на фазные провода;

- снизить уровни и (или) длительности воздействия на ОПН со стороны сети квазистационарных перенапряжений, т.е. понизить характеристику «напряжение-время» сети, что позволит соответственно уменьшить наибольшее рабочее напряжение ОПН, а значит и $U_{8/20}$;

- использовать оборудование с изоляцией, обладающей повышенной прочностью, т.е. увеличить $U_{исп}^{гроз}$;

- установить на присоединенных воздушных линиях на входе РУ дополнительные ОПН, т.е. перейти к «каскадной» схеме; такие схемы защиты оборудования от грозových перенапряжений особенно эффективны при $L_1 > L_2$; в качестве примера на рисунке показана каскадная схема защиты от перенапряжений изоляции автотрансформатора (расстояние от АТ до ближайшего ОПН на этом рисунке обозначено L_2).

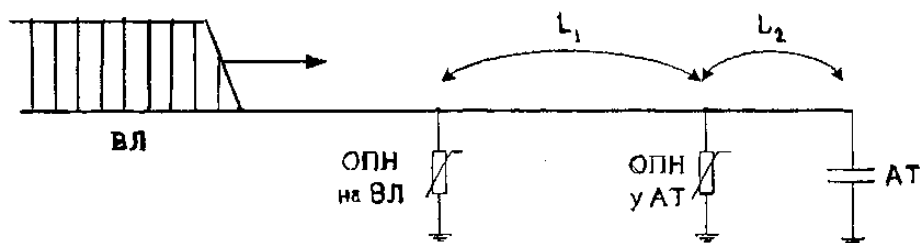


Рисунок 6 – Пример каскадной схемы защиты оборудования от грозových перенапряжений

В зависимости от числа защитных аппаратов и схемы распределительного устройства приведены максимально допустимые расстояния от вентильных разрядников до защищаемого оборудования. В примечаниях к этим таблицам

написано: при использовании ОПН вместо РВ или при изменении испытательных напряжений защищаемого оборудования расстояние до силовых трансформаторов или другого электрооборудования определяется по формуле

$$L_{\text{опн}} = L_{\text{рв}} * \frac{U_{\text{исп}}^{\text{гро3}} - U_{\text{опн}}}{U_{\text{исп}}^{\text{гро3}} - U_{\text{рв}}} \quad (14)$$

где $L_{\text{опн}}$ - расстояние от ОПН до защищаемого оборудования (м);

$L_{\text{рв}}$ - расстояние от разрядника до защищаемого оборудования (м);

$U_{\text{исп}}^{\text{гро3}}$ - испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе (кВ);

$U_{\text{опн}}$, $U_{\text{рв}}$ - остающееся напряжение на ОПН (РВ) при токе 5 кА - для классов напряжения 110-220 кВ; 10 кА - для классов напряжения 330 кВ и выше.

Считается, что номинальный разрядный ток ОПН ($I_{8/20}$) должен соответствовать тем грозовым импульсным токам, которые протекают в ОПН при удаленном ударе молнии, а большой ток - тем грозовым импульсным токам, которые протекают в ОПН при близком ударе молнии или ударе молнии непосредственно в ОПН.

Для РУ грозовые волны, набегающие с присоединенных ВЛ, ограничиваются импульсной прочностью $U_{\text{вл}}^{\text{гро3}}$ изоляции этих ВЛ. Величина импульсного тока $I^{\text{гро3}}$ в ОПН может быть оценена по правилу эквивалентной волны.

$$I^{\text{гро3}} = (2U_{\text{вл}}^{\text{гро3}} - U_{\text{опн}}^{\text{гро3}}) / Z_{\text{вл}}, \quad (15)$$

где $U_{\text{опн}}^{\text{гро3}}$ - остающееся напряжение ОПН в режиме ограничения грозовых перенапряжений;

$Z_{\text{вл}}$ - волновое сопротивление фазного провода ВЛ с учетом импульсной короны. Если предполагать, что при удаленном ударе молнии в ОПН протекают импульсные токи формы 8/20 мкс, то $U_{\text{опн}}^{\text{гро3}} = U_{8/20}$. Тогда для ОПН, установленного в распределительном устройстве, номинальный разрядный ток должен удовлетворять условию:

$$I_{8/20} \geq (2U_{\text{вл}}^{\text{гро3}} - U_{8/20}) / Z_{\text{вл}} \quad (16)$$

В остальных случаях, помимо распределительных устройств станций и подстанций, обосновать расчетами требуемое значение номинального разрядного тока $I_{8/20}$ достаточно сложно, и он может не проверяться, а приниматься такой величины, которую производитель называет для ОПН с энергоемкостью $W_{\text{уд}}$.

Ближкий или прямой удар молнии в ОПН, установленный в распределительных устройствах станций и подстанции, практически исключается правильным выбором системы молниеотводов. Поэтому выбор большого тока ОПН в этом случае проводить не обязательно. Кроме того, следует понимать, что прямой удар молнии в ОПН, учитывая вероятностный характер параметров молниевых разрядов и иные факторы, скорее всего, приведет к протеканию в ОПН тока совершенно другой формы, нежели 4/10 мкс.

В случае, когда ОПН установлен на воздушной линии или в иных местах, где вероятен ближкий или прямой удар молнии, предпочтение следует отдавать ОПН с повышенной величиной импульса большого тока.

7. Методика выбора основных параметров ОПН для сети 6-35 кВ.

Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения.

В сети 6-35 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостного тока замыкания на землю и допускающих неограниченно длительное существование однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), наибольшее рабочее длительно допустимое напряжение ограничителя выбирается равным наибольшему рабочему напряжению электрооборудования для данного класса напряжения по ГОСТ 1516.3. Их значения приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Наибольшее рабочее напряжение электрооборудования и наибольшее длительно допустимое напряжение сети

Класс напряжения электрооборудования	Наибольшее рабочее напряжение оборудования	Номинальное напряжение электрической сети	Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение в электрической сети
6	7,2	6,0	6,9
		6,6	7,2
10	12,0	10,0	11,5
		11,0	12,0
35	40,5	35,0	40,5

Если длительность однофазного замыкания на землю ограничивается, то наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение рассчитывается по формуле

$$U_{нр} = U_{сети} / K_t, \quad (17)$$

где: K_t – коэффициент, равный отношению допустимого изготовителем повышения напряжения в течении t к наибольшему длительно допустимому

рабочему (или номинальному) напряжению ограничителя. Значение k_t определяется для значения t_{O33} по зависимости «допустимое повышение напряжения - время» для случая с предварительным нагружением нормируемым импульсом энергии, которую дает завод-изготовитель. На рисунке 7 в качестве примера приведены характеристики «напряжение-время» ОПН – КР/TEL.

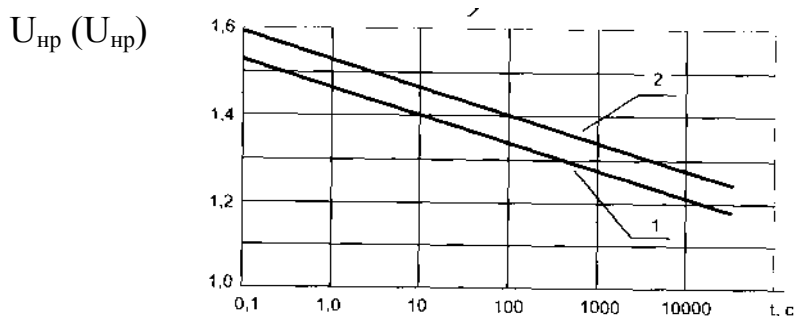


Рисунок 7 - Характеристики «напряжение-время» ОПН – КР/TEL

- 1 - с предварительным нагружением нормируемой энергией;
- 2 - без предварительного нагружения энергией.

Наибольшее рабочее напряжение ОПН $U_{нр}$ выбирается, принимая во внимание следующие факторы:

- наибольшее рабочее напряжение сети, в которую устанавливается ОПН;
- зафиксированные в эксплуатации (в месте предполагаемой установки ОПН) повышения напряжения сверх нормированного значения наибольшего рабочего напряжения сети;
- наличие или отсутствие вращающихся машин 6-10 кВ;
- наличие или отсутствие резистивного заземления нейтрали.

Длительность существования ОЗЗ нормируется ПТЭ в зависимости от вида электрических сетей и составляет:

- с сети, питаемой от генераторов – 2 часа;
- в воздушно-кабельной сети – без ограничения времени.

Нормирование значение $U_{нр}$ действительно для температуры окружающей среды до 45°C с учетом нагрева от солнечной радиации.

Сети 6-35 кВ с изолированной или заземленной через ДГР нейтралью, не содержащие вращающихся машин обладают достаточной прочностью изоляции оборудования. В соответствии с действующими РД кратность дуговых перенапряжений может достигнуть 3,2-3,5 $U_{ф}$, что соответствует максимальному значению перенапряжений, определяемых по формуле 18

$$U_{\text{дуг}} = 3,5 \frac{2 \sqrt{U_{\text{нрс}}}}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

где: $U_{\text{нрс}}$ – наибольшее рабочее напряжение сети.

Для того чтобы отстроить ОПН от дуговых перенапряжений, необходимо выполнить условие, определяемое формулой 19

$$U_{30/60} \geq U_{\text{дуг}} \quad (19)$$

$U_{30/60}$ определяется по формуле 20

$$U_{30/60} = (U_{\text{нр}} \sqrt{2}) K_{30/60}, \quad (20)$$

где значения $K_{30/60}$ даны в таблице 5.

Таблица 5 – Типовые кратности ограничения грозовых и коммутационных перенапряжений.

Класс напряжения, кВ	6	10	35
Расчетный ток грозовых перенапряжений (импульс 30/60 мкс, кА)	5	5	5
Расчетный ток коммутационных перенапряжений (импульс 8/20 мкс, А)	500	500	500
$K_{8/20}$	2,3		
$K_{30/60}$	2		

Условия выбора ОПН для грозозащиты определяются параметрами сети, приведенными в таблице 6.

Таблица 6 – Наибольшее рабочее напряжение ОПН, применяемых для молниезащиты.

Класс напряжения, кВ	6	10	35
Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение $U_{\text{нр}}$, кВ	7,2-7,6	12-12,6	40,5-42,5

В сети, где имеется необходимость защиты, как от грозовых перенапряжений, так и от коммутационных перенапряжений, вызванных ОЗЗ, а также в сети, где имеются вращающиеся машины, расчетным режимом для выбора $U_{\text{нр}}$ ОПН является режим ОЗЗ, при котором напряжение на здоровых фазах в сети повышается до линейного, как это видно на векторной диаграммы (рисунок 8).

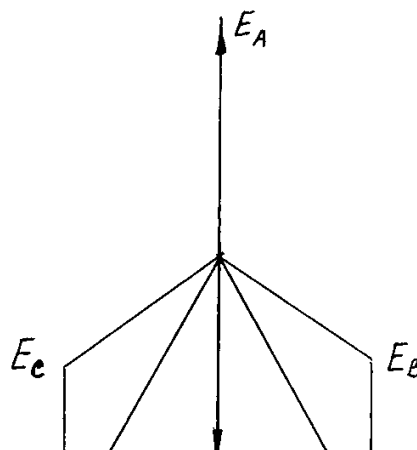


Рисунок 8 - Векторная диаграмма напряжений при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью.

В этом случае $U_{нр}$ определяется по формуле 21

$$U_{нр} = \frac{U_{нрс}}{K_{н-в}} < U_{нрс} \quad (21)$$

Характеристика $K_{н-в}$ «напряжение-время» дается производителями или может быть принято в соответствии с таблицей 7 и задается в относительных единицах.

Таблица 7 – Характеристики «напряжение-время» $K_{н-в}$.

Длительность T приложения повышенного напряжения	Допустимая кратность $K_{н-в}$ (T) превышения напряжения на ОПН, не менее	
	Без нагружения	С предварительным нагружением
0,1с	1,5	1,4
1,0 с	1,43	1,35
10 с	1,37	1,3
100 с	1,31	1,23
1200 с	1,23	1,15
3600 с	1,19	1,1

$U_{нр}$, выбранное таким образом, с одной стороны позволяет обеспечить надежную работу ОПН при воздействии линейного напряжения при ОЗЗ, а с другой – защитить оборудование если не от всех коммутационных перенапряжений, то хотя бы от наиболее опасных. Однако, выбранный указанным способом ОПН, не гарантирует безаварийную его работу при длительном существовании дуговых перенапряжений.

Номинальный разрядный ток ОПН выбирается в случае установки установки ОПН для молниезащиты равным 5 кА. Номинальный разрядный ток в 10 кА принимается в случае:

- наличия интенсивной грозовой деятельности более 50 грозовых часов в год;

- в схемах с вращающимися машинами;
- в районах с высокой степенью промышленных загрязнений (IV и выше степенью загрязнений);
- в схемах с повышенными требованиями к молниезащите.

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

Испытательное напряжение электрооборудования в соответствии с ГОСТ 1516.3 координируется с остающимся напряжением вентильного разрядника при расчетном токе 5 кА. Поэтому остающееся напряжение ОПН ($U_{ост}$) при грозовых перенапряжениях должно быть не выше остающегося напряжения вентильного разрядника группы IV и быть не более, приведенных в таблице 8.

Таблица 8 – Максимальное значение остающегося напряжения при грозовом импульсе на ОПН для сетей 6-35 кВ.

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

При защите электрических машин, присоединенных к ВЛ, значение $U_{ост}$ ОПН, устанавливаемого на выводах машины выбирается ниже значений Приложения 2.

Защитный уровень ОПН при коммутационных перенапряжениях определяет значение остающегося напряжения на ОПН, которое должно быть при расчетном токе коммутационных перенапряжений не более выдерживаемого напряжения изоляцией защищаемого напряжения ($U_{ки}$). Значения $U_{ки}$ для различных видов защищаемого оборудования приведены в Приложениях 1-3.

Уровень ограничения коммутационных перенапряжений при дуговых замыканиях с 10% недокомпенсацией емкостного тока может быть определен по кривой рисунка 8 в зависимости от параметра f по формуле 22

$$f = (50Z / U_{\phi}) * U_{\phi} / A)^{1/\alpha} , \quad (22)$$

где $\alpha = 0,04-0,05$ степень нелинейности варисторов;

$$U_{\Phi} = (U_{\text{нрс}} * \sqrt{2}) / \sqrt{3};$$

$I_{\text{кз}}$ – трехфазный ток к.з. в месте установки ОПН;

$$Z = \sqrt{\frac{1,5 L}{2 (C_0 + C_M)}} \text{ – реактивное сопротивление сети в месте установки ОПН;}$$

C_0, C_M – емкости фазы на землю и между фазами ОПН, $C_M = 0,27C_0$ – для кабеля и $C_M = 0,4C_0$ – для ВЛ;

$$L = U_{\Phi} / 314 * I_{\text{кз}}^3 \text{ – индуктивность сети.}$$

$$C_0 = I_c / 0,942 U_{\Phi} \quad (23)$$

$$A^{500} = U_{500} / 500^{1/\alpha} \quad (24)$$

По полученной величине остающегося напряжения определяют расчетный коммутационный ток по формуле 25

$$I = (U_{500} / A^{500})^{1/\alpha}, \text{ А} \quad (25)$$

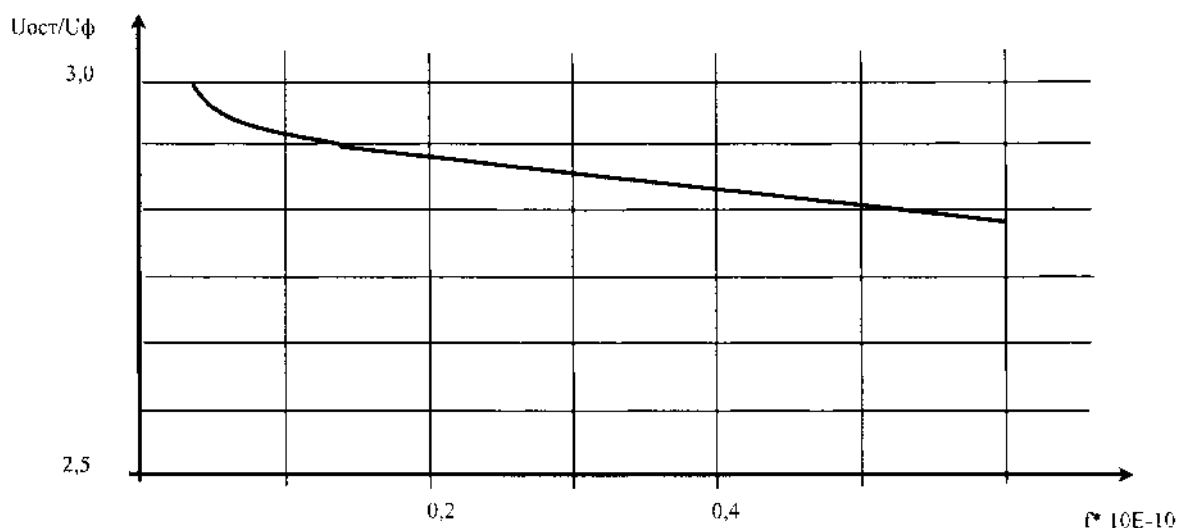


Рисунок 9 – Кривая зависимости уровня ограничения дуговых замыканий на землю при недокомпенсации сети токов ОЗЗ

Выбор энергоемкости ограничителя.

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

При расчетах энергоемкости принимают 10% недокомпенсацию ОЗЗ, которая моделирует возможный аварийный режим.

Суммарная энергия, рассеиваемая ОПН за одно замыкание с учетом повторных замыканий, определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = n \cdot \mathcal{E}_1, \quad (26)$$

где \mathcal{E}_1 – наибольшая энергия, рассеиваемая ОПН в одном цикле гашения–зажигания (гашение в нуле тока промышленной частоты и повторное зажигание в момент максимума восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе). Следует отметить, что в эксплуатации число циклов зажигания – гашений может соответствовать числу полупериодов промышленной частоты за время существования ОЗЗ, то есть только за 1 секунду будет до 100 циклов зажигания – гашения, а за несколько часов ОЗЗ таких циклов будет непредсказуемо много. Поэтому вышеизложенная методика, предложенная ОАО ВНИИЭ, не может быть использована. Рекомендуется: для ОПН энергия одного импульса тока пропускной способности (форма 2000 мкс), отнесенная к значению $U_{нр} W_{уд}$. В таблице 9 приведены рекомендованные диапазоны тока пропускной способности.

Таблица 9 - Рекомендованные диапазоны тока пропускной способности.

Класс напряжения электрооборудования, кВ	6	10	35
$W_{уд}$, кДж/кВ	2-3	2-3	2-3
Импульс 2000 мкс с амплитудой, А	400-600	400-600	400-600

Некоторые производители в каталогах на ОПН:

– относят энергию не к $U_{нр}$ а к номинальному напряжению ОПН. В этом случае рекомендуемая удельная энергия $W_{уд}$ будет меньше значений, указанных в таблице 9;

– указывают энергию $W_{уд}$ не одного, а одновременно двух импульсов пропускной способности; в этом случае рекомендованная удельная энергия будет в два раза больше, чем указано в таблице 9.

Нередко проектные организации выбирают ОПН в зависимости от емкостного тока сети, мотивируя это так: чем больше емкостной ток, тем на большую энергию он должен быть рассчитан. Но чем выше емкостной ток, тем меньше вероятность возникновения дуговых перенапряжений вследствие неустойчивого горения дуги.

Поэтому, в общем случае эта рекомендация не обоснована, как и предусматривать в разветвленной сети параллельную установку нескольких комплектов ОПН.

Как указывалось выше, ОПН не предназначен для ограничения квазистационарных перенапряжений, так как это потребовало бы неоправданных затрат на параллельные элементы в конструкции ОПН. Поэтому рост энергоемкости

ОПН (диаметра варисторов) не является мерой повышения надежности работы ОПН при квазистационарных (в частности дуговых) перенапряжениях. Основной мерой повышения надежности работы ОПН при этих перенапряжениях является увеличение $U_{нр}$ (рост высоты столба варисторов) или снижение воздействия на ОПН со стороны сети.

Ток срабатывания взрывопредохранительного устройства (для сброса давления) для ОПН с фарфоровой рубашкой, выбирают не менее, чем на 10 % больше значения двухфазного и трехфазного (большого из них) тока короткого замыкания в месте установки ограничителя.

Длина пути утечки внешней изоляции ОПН должна выбираться в зависимости от степени загрязнения в соответствии с ГОСТ 9920-89, но должна быть не менее, указанной в таблице 10.

Таблица 10 – Минимальная длина пути утечки внешней изоляции ОПН.

Класс напряжения электрооборудования, кВ	3	6	10	15	20	35
Длина пути утечки, см не менее	7,0	13	22	31,5	43,2	75

Таблица 11 - Минимальная длина пути утечки для ОПН класса напряжения 6-10 кВ в зависимости от степени загрязнения атмосферы.

Степени загрязнения атмосферы (СЗА)	I	II	III	IV	V	VI	VII
Класс напряжения, 6 кВ	137	137	162	188	224	252	303
Класс напряжения, 10 кВ	228	228	270	312	372	420	504

В районах I-III СЗА минимальную длину утечки можно принять по данным таблицы 10. При установки ОПН в районах IV-VII СЗА необходимо проверить соответствие длины пути утечки ОПН данным таблицы 11. В районах I-III СЗА необходимости в такой проверке нет.

8. Выбор ОПН для защиты от грозовых перенапряжений.

Ограничитель для защиты от грозовых перенапряжений должен быть отстроен от работы при перенапряжениях, вызванных однофазными дуговыми замыканиями на землю. Эти требования выполняются при условии, если величина остающегося напряжения на ограничителе при импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой 500А не менее, приведенных в таблице 12.

Таблица 12 – Максимально допустимое остающееся напряжение коммутационного импульса тока 30/60 мкс с амплитудой 500А на ОПН.

Класс напряжения, кВ	3	6	10	15	20	35
----------------------	---	---	----	----	----	----

Напряжение на импульсе 30/60 мкс с амплитудой 500А не менее, кВ	9,0	18	29	43	59	99
---	-----	----	----	----	----	----

Если параметры ограничителя по условиям выбора защитного уровня при грозовых перенапряжениях не удовлетворяют требованиям таблицы 12, то энергоемкость и наибольшее длительно допустимое напряжение ОПН выбирают с учетом его работы при однофазном дуговом замыкании на землю.

В разветвленной сети не экономично отдельно устанавливать ОПН для защиты только от атмосферных перенапряжений, необходимо устанавливать ОПН, предназначенные для защиты, как от атмосферных, так и от коммутационных перенапряжений $U_{нр}$, устанавливаемого на выводах электрических машин ОПН, присоединенных к ВЛ, выбирают в зависимости от времени существования ОЗЗ и характеристики «допустимое повышение напряжения - время».

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

В Республике Беларусь применяется низкоомное заземление нейтрали (обычно применяются резисторы с сопротивлением 50, 100 Ом в зависимости от величины токов ОЗЗ). Величина сопротивления резистора выбирается таким образом, чтобы ток через резистор при ОЗЗ был не менее емкостного тока ОЗЗ. В этом случае перенапряжения при дуговых замыканиях на землю ограничиваются до уровня 2,2-2,4 $U_{ф}$, а релейная защита надежно отключает поврежденное присоединение.

Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН выбирается исходя из:

- наибольшее рабочее напряжение сети не должно превышать соотношения «напряжение – время», указанные в таблице 7;
- длительность ОЗЗ определяется временем действия релейной защиты, отключающей ОЗЗ. Это время с учетом селективности работы РЗА не превышает 5с;
- с учетом отключения ОЗЗ за время не более 1с (при наличии микропроцессорных защит) $U_{нр}$ может быть снижено до уровня 6,6 и 10,5 кВ в соответствующих сетях;
- ограничитель включается в цепь заземляющего трансформатора до выключателя.

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

Установка ОПН на присоединениях с вакуумными выключателями огра-

ничивает перенапряжения, связанные с обрывом тока и эскалацией напряжений, сокращает число повторных зажигания, а, следовательно, число опасных перенапряжений и полностью исчезают перенапряжения при виртуальном срезе тока. Защита от перенапряжений требуется при коммутациях вакуумными выключателями присоединений с электродвигателями и трансформаторами. Не требуется защита от перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями:

- электродвигателей мощностью 1800 кВт и более;
- трансформаторов, защищенных по условиям молниезащиты ОПН;
- трансформаторов, длина подключаемых кабелей которых больше или равна, приведенным в таблице 13.

Таблица 13 – Длина кабелей подключения трансформаторов, при которых нет необходимости установки ОПН.

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

Наибольшая эффективность ОПН для защиты от перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями, достигается при установке ОПН непосредственно у защищаемого объекта. Установка ОПН параллельно выключателю малоэффективна.

Возможна установка ОПН (при отсутствии возможности установки ОПН у электродвигателя) в ячейке выключателя в начале кабеля. В этом случае необходима проверка уровня перенапряжений на двигателе, который не должен превышать выдерживаемый изоляцией двигателя уровень испытательных напряжений. Зависимость выдерживаемых изоляцией электродвигателей импульсных воздействий от длины фронта импульса t_f , приведенных на рисунке 10. ОПН необходимо устанавливать даже в том случае, когда в ячейке присоединения электродвигателя имеется R-C цепочка для снижения уровня перенапряжений.

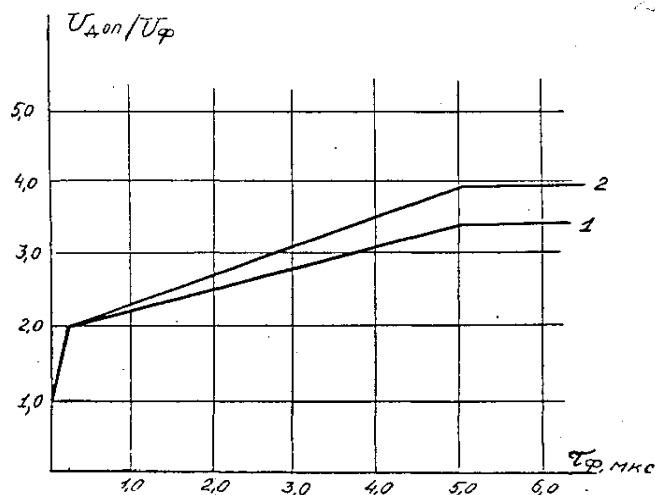
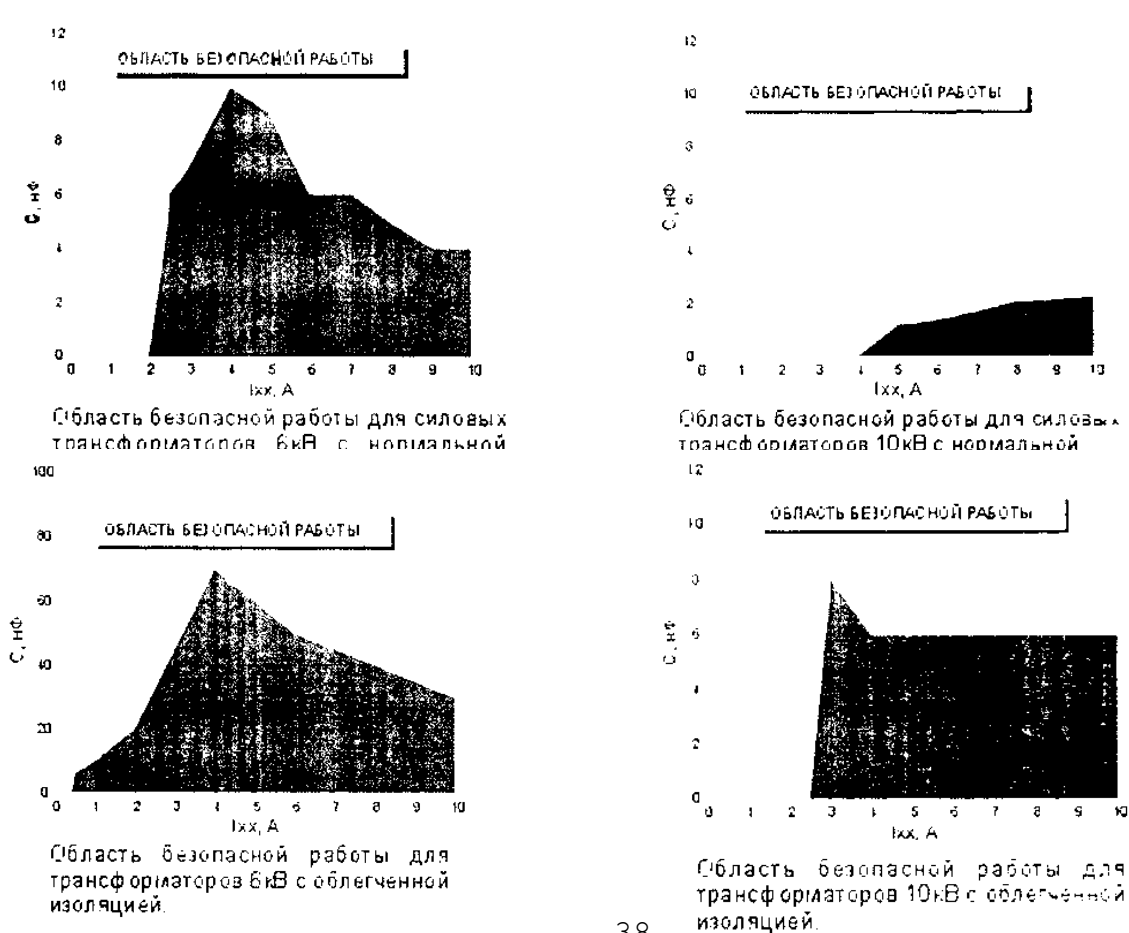


Рисунок 10 – Зависимость выдерживаемых изоляцией электродвигателей 6 кВ импульсных воздействий от длины фронта импульса:

- 1 - для двигателей до 1000 кВт,
- 2 - для двигателей более 1000 кВт.

На рисунке 11 изображена область безопасной работы вакуумных выключателей при необходимости использования ОПН в присоединениях с силовыми трансформаторами, коммутируемыми вакуумными выключателями. В этом случае необходимо руководствоваться областями безопасной работы, построенными в координатах «ток холостого тока – емкость» присоединения. За опасные перенапряжения принимаются напряжения, больше или равные амплитуде испытательного напряжения для изоляции по ГОСТ1516.3-2001.



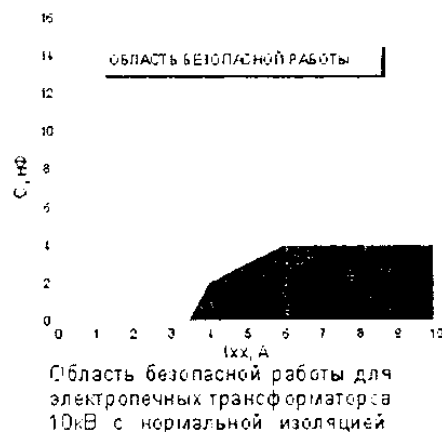
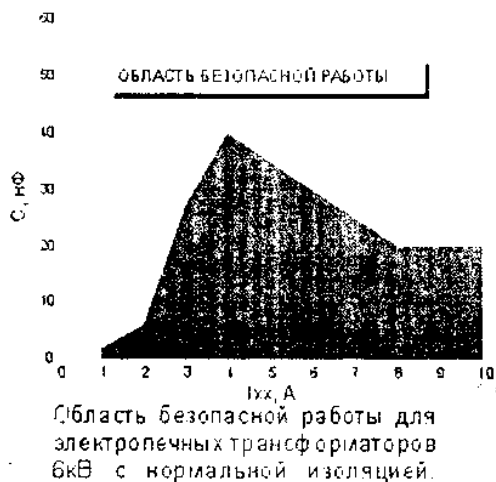


Рисунок 11 - Область безопасной работы вакуумных выключателей 6-10 кВ

I_{xx} – ток холостого хода трансформатора определяется по паспорту;
 $C_{нф}$ – фазная емкость подводимого кабеля.

Если расчетная точка попадает в заштрихованную область, то рекомендуется установка ОПН по схеме «фаза - земля».

11. Типовые и особые случаи применения ОПН 6-35 кВ

Для корректного выбора схем расстановки и технических характеристик ОПН 6-35 кВ необходимо проведение расчетов в следующих «особых» случаях:

- защита от грозовых перенапряжений изоляции ВЛ 6-35 кВ;
- защита от перенапряжений сетей генераторного напряжения;
- защита от перенапряжений изоляции «экран-земля» однофазных кабелей высокого напряжения;
- защита от перенапряжений в сетях с повышенным содержанием гармоник;
- защита от перенапряжений в сетях с резистивно-заземленной нейтралью (в том числе защита от перенапряжений в сетях с нейтралью, заземленной через параллельное соединение ДГР и резистора).

Для защиты от грозовых перенапряжений в сетях 6-35 кВ необходимо устанавливать ОПН в ряде характерных мест, перечисленных ниже (некоторые из этих мест указаны и в ТКП-339-2011):

- на стороне 6-35 кВ силовых трансформаторов (автотрансформаторов) для защиты от грозовых перенапряжений, вызванных грозовыми волнами, набегающими с присоединенных ВЛ 6-35 кВ; не допускается наличие коммутационных аппаратов в цепи между трансформатором и защитным

аппаратом, так как только в этом случае даже при отключенном выключателе 6-35 кВ обеспечивается защита обмоток 6-35 кВ трансформаторов от грозовых перенапряжений, вызванных переходом грозовых волн через трансформатор с других обмоток;

- непосредственно у выводов 6-10 кВ двигателей (если они в конкретных условиях эксплуатации могут подвергаться воздействию грозовых перенапряжений); при небольшой длине кабеля питающего двигатель, допустимо устанавливать ОПН не у двигателя, а в ячейке выключателя;

- на секциях шин 6-35 кВ (например, у измерительных трансформаторов напряжения) или на подходах воздушных линий 6-35 кВ к РУ (например, непосредственно в ячейке выключателя ВЛ со стороны линии); в этом случае обеспечивается повышенная защищенность оборудования от грозовых перенапряжений по сравнению со случаем, когда ОПН установлены только у силовых трансформаторов;

- в местах сетис ослабленной изоляцией (у металлических опор на линии с деревянными опорами, у кабельных муфт и т.д.);

В случае наличия коммутационного аппарата между трансформатором и защитным аппаратом, должна обеспечиваться защита обмоток 6-35 кВ силовых трансформаторов от коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении ненагруженных трансформаторов со срезом тока в выключателе; защита от этого вида перенапряжений необходима, если соединение трансформатора и выключателя выполнено воздушной ошиновкой, и не требуется, если трансформатор присоединен к выключателю кабелем, длина которого превосходит определенную величину, зависящую от типа выключателя, длины и типа кабеля, а также от мощности трансформатора; безопасной считается длина кабеля более 50 м. Если опасности воздействия молнии подвергается только первичная обмотка трансформатора, то необходимо защищать не только ее, но и вторичную обмотку, так как до 40% перенапряжений способно навестись на нее емкостным путем. При вероятности воздействия грозовых перенапряжений только на вторичную обмотку трансформатора достаточно присоединения ОПН только к ней. При этом будет осуществлена защита от перенапряжений, возникающих при включении «холостых» трансформаторов;

- непосредственно у выводов 6-10 кВ двигателей; в этом случае обеспечивается защита обмоток двигателей от коммутационных перенапряжений, возникающих при их включении и отключении; при небольшой длине кабеля питающего двигатель, допустимо устанавливать ОПН не у двигателя, а в ячейке выключателя с той стороны, с которой находится

коммутируемый кабель с двигателем на конце;

– в ячейке вакуумного выключателя с той стороны, с которой находится коммутируемое присоединение; в этом случае обеспечивается защита присоединения от коммутационных перенапряжений, характерных при работе вакуумных выключателей для защиты от коммутационных перенапряжений достаточно устанавливать ОПН только в тех ячейках вакуумных выключателей, которые коммутируют двигатели, трансформаторы, установка ОПН в других ячейках, как правило, не требуется (рекомендуется в ячейках воздушных линий, но исключительно для ограничения грозовых перенапряжений на входе РУ); если на коммутируемом присоединении уже есть ОПН (например, у выводов двигателя, трансформатора), то установка каких-либо ОПН в ячейке вакуумного выключателя не требуется; следует понимать, что установка ОПН в ячейке вакуумного выключателя со стороны секций шин не влияет на перенапряжения на коммутируемом присоединении, т.е. неэффективна для его защиты от коммутационных перенапряжений; установка ОПН параллельно контактам вакуумного выключателя не рекомендуется.

Для защиты витковой изоляции двигателей от волн коммутационных перенапряжений с крутым фронтом применение ОПН неэффективно, и поэтому в ряде случаев рекомендуется использовать в дополнение к ОПН специальные конденсаторы (или RC цепочки), устанавливаемые на выводах двигателей.

В силу сравнительно невысокой импульсной прочности изоляция ВЛ 6-35 кВ достаточно часто перекрывается даже от индуктированных грозовых перенапряжений, вызванных ударами молнии вблизи от ВЛ (тем более такая изоляция перекрывается при прямых ударах молнии в ВЛ).

Установка ОПН на опорах ВЛ 6-35 кВ для защиты ее изоляции от грозовых перенапряжений является особым случаем использования ОПН, так как наиболее часто ОПН все же применяются в распределительных устройствах станций и подстанций.

Подвесные ограничители перенапряжений ОПН 6-35 кВ устанавливаются на опорах ВЛ 6-35 кВ параллельно гирляндам линейных изоляторов, т.е. между фазным проводом и траверсой опоры.

На основе ряда расчетов, проведенных для ВЛ 6-35 кВ, сделаны следующие обобщающие рекомендации относительно мест установки ОПН:

– для эффективной защиты изоляции всей ВЛ от грозовых перенапряжений необходима установка ОПН на каждой опоре;

– для эффективной защиты изоляции отдельных («проблемных») опор ВЛ от грозовых перенапряжений необходима установка ОПН только на этих опорах;

– для исключения перекрытий изоляции на одноцепной опоре необходима установка ОПН сразу во все фазы на опоре;

– для исключения двухцепных перекрытий изоляции на двухцепных опорах установка ОПН достаточна только в фазы одной из цепей.

Система молниеотводов исключает прямые удары молнии в оборудование распределительных устройств, а значит и в установленные там ОПН. В случае установки ОПН на опорах ВЛ становятся возможными прямые удары молнии в ОПН, т.е. существует реальный риск выхода из строя этих защитных аппаратов. Особенно такой риск велик в случае установки ОПН на ВЛ, не оснащенных грозозащитным тросом, так как в этом случае значительная часть ударов молнии в ВЛ приходится не на заземленный грозозащитный трос, а на фазные провода, т.е. фактически непосредственно в ОПН.

Снижение риска повреждения ОПН 6-35 кВ в случае их применения на воздушных линиях 6-35 кВ достигается:

- совместным применением ОПН с грозозащитными тросами;
- выбором ОПН повышенной энергоемкости с допустимым для него импульсом большого тока (импульс 4/10 мкс) амплитудой 100 кА;
- увеличением числа опор ВЛ, на которых установлены ОПН, так как это приводит к снижению выделяющейся энергии в каждом аппарате за счет рассеивания энергии разряда молнии не в одном ОПН, а в большом количестве работающих параллельно аппаратов.

Конкретное значение энергоемкости ОПН для ВЛ 6-35 кВ зависит от многих факторов (например, от наличия грозотроса) и должно определяться на основе расчетов. В частности, применение ОПН на ВЛ 6-35 кВ без тросовой защиты не рекомендуется, если энергоемкость ОПН менее $W_{уд} = 5 \text{ кДж/кВ}$ (значение приведено к $U_{нр}$ и указано для одного импульса).

Наибольшее рабочее напряжение ОПН на ВЛ 6-35 кВ приведено в таблице 14 - его рекомендуется принимать на 5% выше наибольшего рабочего напряжения сети.

Таблица 14 - Зависимость наибольшего рабочего напряжения ОПН от наибольшего рабочего напряжения сети

Класс напряжения, кВ	6	10	35
$U_{нр}$, кВ	7,6	12,6	42,5

Среди прочих характеристик ОПН для ВЛ 6-35 кВ важную роль играет амплитуда импульса большого тока (форма 4/10 мкс). В частности, на ВЛ 6-35 кВ без тросовой защиты рекомендуется применять ОПН с амплитудой импульса большого тока 100 кА.

Ток срабатывания взрывопредохранительного устройства (для сброса

давления) ОПН выбирают не менее, чем на 10% больше значения двухфазного или трехфазного (большого из них) тока короткого замыкания в месте установки ОПН.

В ОПН с полимерной изоляцией (силиконовой резиной) взрывопредохранительное устройство отсутствует.

12. Повышение надежности ОПН в сетях 6-35 кВ

Большинство повреждений ОПН в сетях 6-35 кВ с изолированной или заземленной через ДГР нейтралью происходит из-за дуговых, резонансных и феррорезонансных перенапряжений.

Кратности дуговых перенапряжений таковы, что правильным выбором наибольшего рабочего напряжения ОПН 6-35 кВ можно практически отстроить ОПН от многократных срабатываний, существенно повысив надежность его работы, т.е. уменьшив (но не исключив) риск его повреждения. В то же время повышенная энергоемкость ОПН практически не изменяет его надежности, зато однозначно приводит к его удорожанию.

Кратности и энергия резонансных и феррорезонансных перенапряжений таковы, что ни выбором рабочего напряжения ОПН, ни выбором энергоемкости невозможно обеспечить безаварийную работу ОПН при этих видах перенапряжений. В случае возникновения резонансных и феррорезонансных перенапряжений вероятность повреждений ОПН тем выше, чем дольше они существуют.

Учитывая изложенное, рекомендуется:

– в сетях с изолированной или заземленной через ДГР нейтралью постараться снизить время поиска персоналом поврежденного присоединения, не допуская длительной работы в режиме однофазного замыкания на землю, поскольку этот режим опасен не только для ОПН, но и для другого оборудования сети;

– в сетях 6-35 кВ с ДГР не допускать работу с недокомпенсацией емкостного тока сети, что позволит исключить возможность развития резонансных перенапряжений;

– использовать в сетях 6-35 кВ антирезонансные измерительные трансформаторы напряжения, что позволит исключить развитие феррорезонанса вследствие насыщения их стали (на условия возникновения феррорезонанса при неполнофазных режимах включения силовых трансформаторов это не повлияет);

– перейти к «низкоомному» заземлению нейтрали, позволяющему не только обеспечить безаварийную эксплуатацию ОПН при квазистационарных

перенапряжениях, но и создать условия для селективной работы релейной защиты по отключению от сети поврежденного присоединения.

При защите трансформатора, подключенного к ВЛ, ОПН должен устанавливаться на защищаемом трансформаторе или рядом с трансформатором, но не далее чем 5м от него, считая расстояние по ошиновке. ОПН устанавливается до коммутационного аппарата.

Точки заземления корпуса (бака) трансформатора и заземляющего зажима ОПН, должны быть в одном месте или находиться как можно ближе друг от друга.

Воздушные линии электропередачи могут содержать кабельные вставки по длине линии и кабельные вводы (выходы) по концам ВЛ. Если длина кабельного ввода (выхода), соединяющего ВЛ с шинами (оборудованием) подстанции более 15м предусматриваются 2 комплекта ОПН. Один комплект устанавливается на переходе ВЛ в КЛ, а второй – на шинах подстанции. При длине кабельного ввода 15м и менее достаточно установки одного комплекта ОПН на шинах подстанции.

На опорах с кабельными муфтами, где установлены ОПН, заземляющий зажим ОПН, металлическая оболочка (экран), броня кабеля, а также при наличии металлический корпус кабельной муфты должны быть соединены между собой по кратчайшему пути и соединены с контуром заземления опоры.

При замене вентильных разрядников на ОПН, ограничители перенапряжений, как правило, устанавливаются на месте установки вентильных разрядников.

Допускается, как временная мера, производить пофазную замену РВ на ОПН. Предпочтительное место установки ОПН на секциях – посередине секции, так как зона защиты ОПН – 4-5 ячеек (присоединений).

На ВЛ перед входом в РУ должны быть установлены ОПН для защиты оборудования сборных шин. «Нормальные разрывы» должны защищаться ОПН.

Секционирующие выключатели и разъединители в сети 6-10 кВ должны быть защищены ОПН с двух сторон. При отсутствии АВР (автоматического ввода резерва) «нормальный разрыв» необходимо держать на разъединителе.

13. Выбор ОПН в сети 0,4 кВ.

В сети 220/400 В с глухозаземленной нейтралью (система заземления TN-C, TN-3, TN-C-3), включенный между фазным проводом и землей, нулевым проводом (N) и землей выбирается по условию формулы 27, 28

$$U_{нр} \geq U_{\phi} \geq 1,1 \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (27)$$

$$I_c = 3IL \quad (28)$$

где U – номинальное линейное напряжение сети, В.

Для сети с изолированной нейтралью, в которой предусмотрено отключение однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) за время менее 10с $U_{нр}$ выбирается по условию 29

$$U_{нр} \geq 0,75U \quad (29)$$

Основной принцип установки низковольтных ОПН:

- ОПН должны быть расположены перед защищаемым оборудованием по ходу движения импульса, который движется со стороны ВЛ;
- ОПН должны устанавливаться настолько близко к защищаемому оборудованию насколько это технически возможно.

14. Защитные расстояния ОПН

Эффективность защиты изоляции электрооборудования от перенапряжений зависит не только от остающихся напряжений ограничителя, но также и от размещения ОПН по отношению к защищаемому оборудованию. Причиной увеличения перенапряжения на оборудовании при удалении от него ОПН является эффект отражения волн перенапряжения от концов кабеля или увеличение падения напряжения на индуктивном сопротивлении присоединительных проводников ОПН при прохождении через него высокочастотных импульсов тока.

Защитное расстояние ОПН можно приближенно рассчитать по формуле 30

$$U = U_{ост} + (2SL) / v, \quad (30)$$

где U - напряжение на защищаемом оборудовании, кВ;

$U_{ост}$ - остающееся напряжение на ОПН, кВ;

S -крутизна фронта волны перенапряжения, кВ/мкс;

L -расстояние между ОПН и оборудованием, м;

V -скорость распространения волны перенапряжения, 300 м/мкс для воздушных линий и 150 м/мкс - для кабельных сетей.

Во всех случаях необходимо стремиться, чтобы расстояние между ОПН и защищаемым оборудованием было как можно меньше и не превышало 3-6 метров.

Нелинейные ограничители перенапряжений, как правило, присоединяют параллельно защищаемому устройству между фазой и «землей».

15. Выбор характеристик ОПН 110-750 кВ в типовых случаях

Наибольшее рабочее напряжение $U_{нрo}$ выбирается, принимая во внимание следующие факторы:

- наибольшее рабочее напряжение сети в месте установки ОПН (классы напряжения электрооборудования сетей 110-750 кВ согласно ГОСТ 1516.3 приведены в таблице 15);
- зафиксированные в эксплуатации (в месте предполагаемой установки ОПН) повышения напряжения сверх нормированного значения наибольшего рабочего напряжения сети;
- наличие или отсутствие трансформаторов с разземленной нейтралью.

Таблица 15 – Наибольшее рабочее напряжение сети в месте установки ОПН.

Класс напряжения, кВ	110	220	330	750
$U_{нрс}$, кВ (для сети)	127	253	363	788
$U_{нрс} / \sqrt{3}$ (для сети, фазное значение)	73	148	210	455

Наибольшее рабочее напряжение $U_{нрo}$, приведенное в таблице 16, принимается на 5% выше наибольшего длительно допустимого рабочего (фазного) напряжения сети $U_{нрс} / \sqrt{3}$.

Таблица 16 – Наибольшее рабочее напряжение ОПН.

Класс напряжения, кВ	110	220	330	750
$U_{нрo}$, кВ	77	153	220	477

Если в эксплуатации имело место превышение фазным сетевым напряжением уровня $U_{нрс} / \sqrt{3}$, то наибольшее рабочее напряжение $U_{нр}$ принимается на 5% выше максимального зафиксированного (фазного) напряжения сети.

Если часть трансформаторов 110-220 кВ в распределительном устройстве работает с разземленной нейтралью 110-220 кВ, то наибольшее рабочее напряжение ОПН 110-220 кВ, устанавливаемых в таком РУ, принимается на 10-20% выше наибольшего рабочего (фазного) напряжения сети $U_{нрс} / \sqrt{3}$ и приведено в таблице 17.

Таблица 17 – $U_{нр}$ ОПН 110-220 кВ в сети, где часть трансформаторов работает с разземленной нейтралью.

Класс напряжения, кВ	110	220
$U_{нр}$, кВ	86-88	160-176

Если все трансформаторы 110-220 кВ в распределительном устройстве работают с разземленной нейтралью стороны 110-220 кВ, то наибольшее рабочее напряжение ОПН 110-220 кВ, устанавливаемых в таком РУ, принимается на 20% выше наибольшего рабочего (фазного) напряжения

сети и приведено в таблице 18.

Таблица 18 – Наибольшее рабочее напряжение ОПН 110-220 кВ, установленные в сети, где все трансформаторы с разземленными нейтральными.

Класс напряжения, кВ	110	220
$U_{нрo}$, кВ	88	176

При наличии высших гармоник в нормальных режимах в месте установки ОПН поступают следующим образом:

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

- если амплитуда гармоник неизвестна, то наибольший уровень напряжения в сетив точке установки ОПНв нормальном режиме принимают равным 1,1 от наибольшего напряжения сети;

Устойчивое существование высших гармоник в сети возможно в следующих случаях:

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

- в послеаварийных режимах питания тупиковых подстанций с активной нагрузкой менее 0,1 от натуральной мощности ($P_{нат}$), передаваемой по питающей линии длиной 180-350км. Натуральная мощность линии определяется по формуле 31

$$P_{нат} = U_{ном}^2 / Z_1 \quad (31)$$

где Z_1 – волновое сопротивление линии по прямой последовательности.

По энергоемкости выпускаемые ОПН делят на пять классов. Данные по энергоемкости приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Удельная энергоемкость ОПН

Удельная энергоемкость, кДж/кВ	до 2	2,5-3,0	4-4,5	7	10,0
Амплитуда прямоугольного импульса длительностью 2000 мкс, А	250-300	450-600	900-1000	1200-1350	1800-1900
Класс разряда линии	1	2	3	4	5

Рекомендуемая для ОПН энергия одного импульса тока пропускной способности (форма 2000 мкс), отнесенная к значению $U_{нр}$ обозначена $w_{уд}$ и приведена в таблице 20. В таблице так же указаны рекомендуемые диапазоны тока пропускной способности.

Некоторые производители в каталогах на ОПН:

- относят энергию не к наибольшему рабочему напряжению ОПН ($U_{нрo}$),

а к номинальному напряжению ОПН ($U_{\text{ном}}^{\text{ОПН}}$); в этом случае рекомендуемая удельная энергия $w_{\text{уд}}$ будет меньше значений, указанных в таблице;

– указывают энергию $w_{\text{уд}}$ не одного, а одновременно двух импульсов тока пропускной способности; этом случае рекомендуемая удельная энергия будет в два раза больше, чем указано в таблице 20.

Таблица 20 – Энергия пропускной способности одного импульса 2000 мкс.

Класс напряжения, кВ	110	220	330	750
$w_{\text{уд}}$, кДж/кВ	1,5-2,5	2,5-3,5	3,5-4,5	5,5-6,5
Импульс 2000 мкс с амплитудой, А	400-500	500-600	700-900	1300-1500

При возможности возникновения переходного резонанса (при отсутствии выключателей на стороне ВН, коммутация блока линия-трансформатор) на второй или третьей гармонике при установке в сетях с частично разземленными нейтралью трансформаторов, ОПН должен иметь энергоемкость не менее 4,5-5 кДж/кВ номинального напряжения.

Выбранный ограничитель проверяется на соответствие его временных повышений напряжений квазиустановившимся перенапряжениям при различных видах коммутации с учетом времени действия релейной защиты, линейной противоаварийной автоматики. Нормируемые техническими условиями зависимости $U_{\text{вно}}$ (допустимое напряжение временных перенапряжений ОПН) от их допустимой длительности дается производителем в табличном виде или в виде линейных зависимостей «напряжение промышленной частоты-время» в полулогарифмическом масштабе. В качестве примера на рисунке 12 приведена такая зависимость.

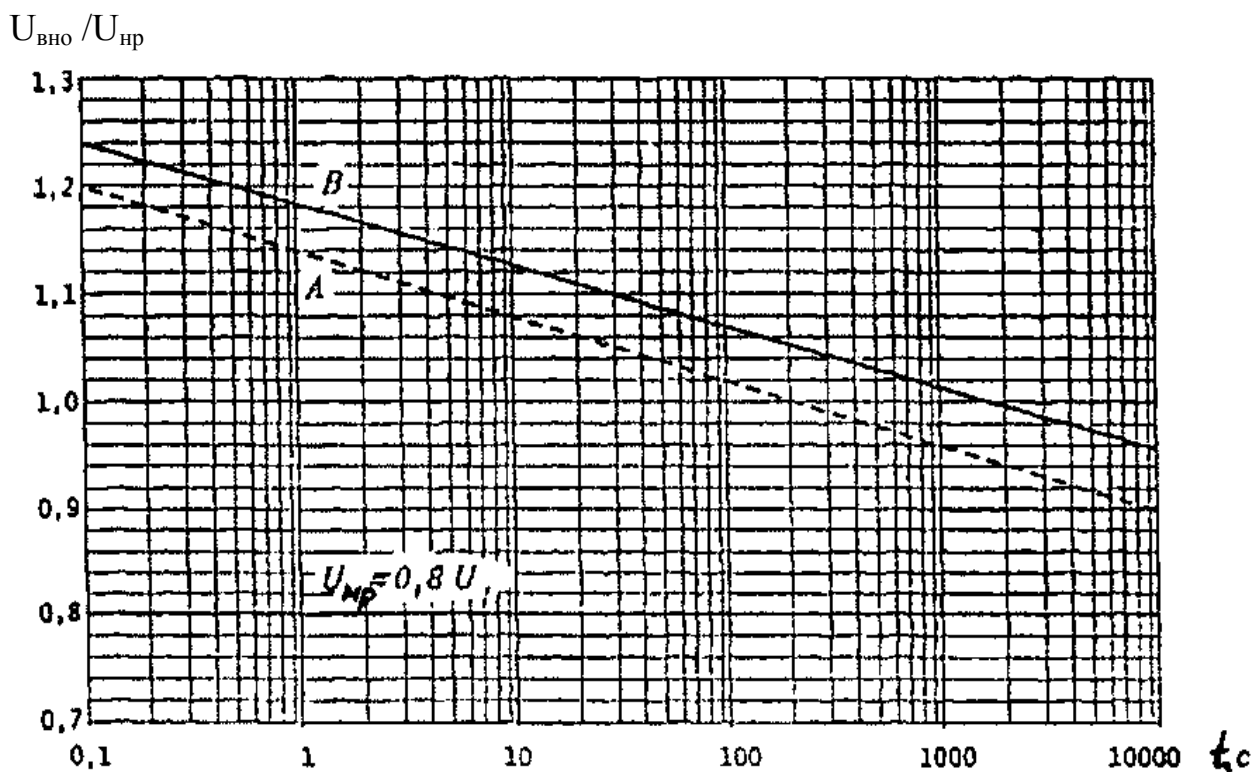


Рисунок 12 – Зависимость относительных величин временных перенапряжений промышленной частоты, которые должны выдерживать ограничители от их длительности:

А - при предварительном нагружении удельной поглощаемой энергией $10 \text{ кДж/кВ}U_{\text{ном}}^{\text{опн}}$ при температуре окружающего воздуха $+45^\circ\text{C}$,

В - в исходном состоянии при температуре окружающего воздуха $+45^\circ\text{C}$

Расчетными для определения U_y являются следующие коммутации:

– для ограничителей, устанавливаемых на шинах или трансформаторах (автотрансформаторах), которые по схеме ОРУ не коммутируются вместе с линией, или коммутируются с линией длиной не более 50 км, определяющими являются квазиустановившиеся перенапряжения на неповрежденных фазах при несимметричном КЗ на шинах подстанции. Перенапряжения в этом случае можно определить по Приложению 3, при этом входные сопротивления прямой и нулевой последовательности $Z_{\text{вх1}}$ и $Z_{\text{вх0}}$ определяют как эквивалентные сопротивления для определения токов трехфазного и однофазного КЗ на шинах. Так как при эффективном заземлении нейтрали отношение $Z_{\text{вх0}}/Z_{\text{вх1}} \approx 3,0$, то в этом случае $U_y \approx 1,4U_{\text{ф}}$;

– для ограничителей, устанавливаемых на линии, шунтирующем реакторе на линии или на присоединенных непосредственно к линии (без выключателей) трансформаторах:

– трехфазное одностороннее отключение однофазного КЗ на противоположном конце линии;

– трехфазное одностороннее отключение КЗ при действии автоматики прекращения асинхронного хода;

– неполнофазные режимы одностороннего включения или отключения линии с подключенными к ней шунтирующими реакторами, автотрансформаторами или трансформаторами. К этому случаю относится также неполнофазное включение или отключение линии при выводе в ремонт или отказе линейного выключателя на подстанции с выключателями, если при действии УРОВ или по режиму линии отключаются все смежные присоединения.

Наибольшие квазиустановившиеся перенапряжения бывают в несимметричных режимах:

– одностороннего отключения несимметричного КЗ вследствие каскадного действия релейной защиты;

– неполнофазного включения и отключения линии, в том числе и с учетом действия УРОВ, вследствие отказа фаз коммутируемого выключателя.

В таблицах 21 и 22 приведена величина квазиустановившихся перенапряжений; их также можно определить по кривым рисунка 13,14.

Таблица 21 - Квазиустановившиеся перенапряжения при неполнофазном отключении линии

Напряжение и конструкция фазы	Число ШР		Максимальные напряжения	Границы зоны, км
	в начале	в конце		
750 кВ, 5АСО	1	-	1,51	115 - 140
	1	1	1,39	250 - 290
	2	1	1,42	390 - 420

Таблица 22 - Квазиустановившиеся перенапряжения при неполнофазной коммутации линии с трансформатором на конце

Напряжение, кВ конструкция фазы ВЛ мощность тр-ра, МВА	Кол-во включенных фаз ВЛ	Макс. перенапряжения		Границы опасной зоны	
		В начале ВЛ	на тр-ре	по ОПН на конце ВЛ	ПО ОПН на тр-ре
110; АС 70; 6,3 МВА	Вкл-ние 2ф	1,75	1,6	70 - 350	80 - 325
	Вкл-ние 1ф	1,60	1,39	400 - 600	325 - 400
110; АС 240; 10 МВА	Вкл-ние 2ф	2,45	2,07	110 - 480	125 - 425
	Вкл-ние 1ф	2,00	2,2	400 - 700	310 - 600
220; АС 240; 40 МВА	Вкл-ние 2ф	2,0	1,9	50 - 340	60 - 270
	Вкл-ние 1ф	1,85	1,4	250 - 500	270 - 450
220; АС 400; 63 МВА	Вкл-ние 2ф	2,15	1,95	70 - 420	80 - 360
	Вкл-ние 1ф	2,05	1,75	325 - 500	260 - 600
500; 3АС 330; 500 МВА	Откл. 1ф (ОШР)	2,65	2,37	60 - 420	70 - 370
	Откл. 1ф (1ШР)	2,39	2,15	205 - 525	210 - 490

Напряжение, кВ конструкция фазы ВЛ мощ- ность тр-ра, МВА	Кол-во включенных фаз ВЛ	Макс. перенапря- жения		Границы опасной зоны	
		В начале ВЛ	на тр- ре	по ОПН на конце ВЛ	ПО ОПН на тр-ре
	Откл. 2ф (ОШР)	2,45	1,7	240 - 570	290 - 500
	Откл. 2ф (1ШР)	2,30	1,6	400 - 750	450 - 700
	Вкл. 2ф (ОШР)	2,6	2,39	50 - 410	70 - 390
	Вкл. 2ф (1ШР)	2,39	2,15	210 - 525	225 - 490
750; 5АС 330; 1250 МВА	Откл. 2ф (ОШР)	2,35	2,0	190 - 600	210 - 550
	Откл. 2ф (1ШР)	2,35	2,05	270 - 650	300 - 600
	Откл. 1ф (ОШР)	2,35	2,29	35 - 360	50 - 350
	Откл. 1ф (1ШР)	2,25	2,15	160 - 460	155 - 440
	Вкл. 2ф (ОШР)	2,35	2,28	40 - 360	50 - 350
	Вкл. 2ф (1ШР)	2,26	2,19	180 - 470	170 - 450

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

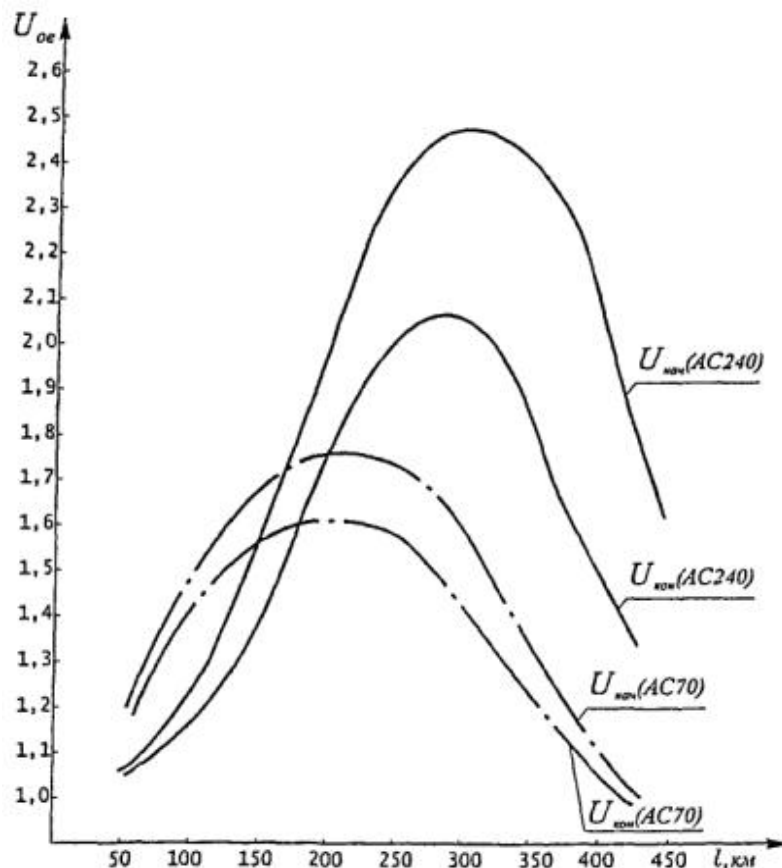


Рисунок 13 – Максимальные величины установившихся перенапряжений в полублочной схеме электропередачи 110 кВ при включении 2-х фаз ВЛ.

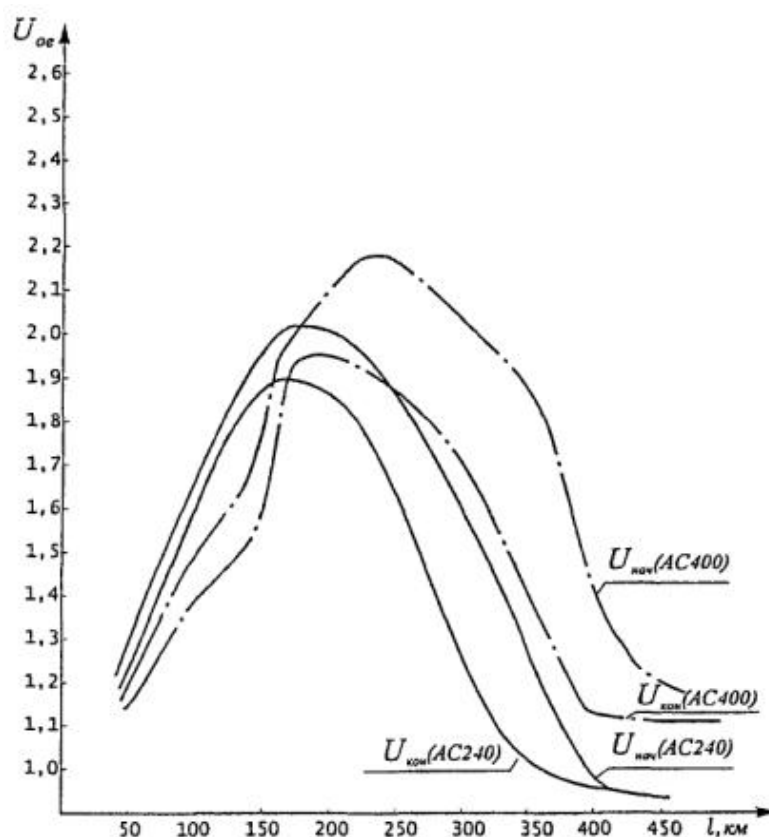


Рисунок 14 – Максимальные величины установившихся перенапряжений в полублочной схеме электропередачи 220 кВ при включении 2-х фаз ВЛ.

Длительность существования квазиустановившихся перенапряжений t_y зависит от вида установившегося режима.

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

- при трехфазном отключении асинхронного хода время существования режима - от 0,5 - 1,0 с при действии второй ступени автоматики от повышения напряжения с установкой по напряжению 1,2 - 1,3, до 5 - 10 с при действии ее первой ступени с установкой 1,1 от $U_\phi = U_H / \sqrt{3}$.

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

Во всех случаях возможного появления высших гармоник рекомендуется применять ограничители с более высоким значением наибольшего длительно допустимого напряжения либо более высокого класса энергоемкости.

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

В сетях 110 кВ особым случаем является неполнофазная коммутация линии с подключенными к ней трансформаторами с разземленными нейтралью на отдельных подстанциях при сохранении эффективного заземления нейтрали сети. Наиболее часто неполнофазные коммутации возникают при отказах фазы выключателя при включении или отключении линии головным выключателем, реже - при обрывах проводов фазы ВЛ или ее отпаях. В этом случае возникают повышения напряжения, обусловленные последовательным включением индуктивных сопротивлений намагничивания фаз трансформатора и емкости оборванной фазы ВЛ. Величина этих повышений напряжений может быть достаточно высокой.

На рисунке 15 приведены обобщенные зависимости (в относительных единицах) фазного напряжения на линии $U_{\phi л}$ и напряжения на нейтрали трансформатора U_N от тока намагничивания трансформатора I_m с разземленной нейтралью при обрыве фазы этой линии.

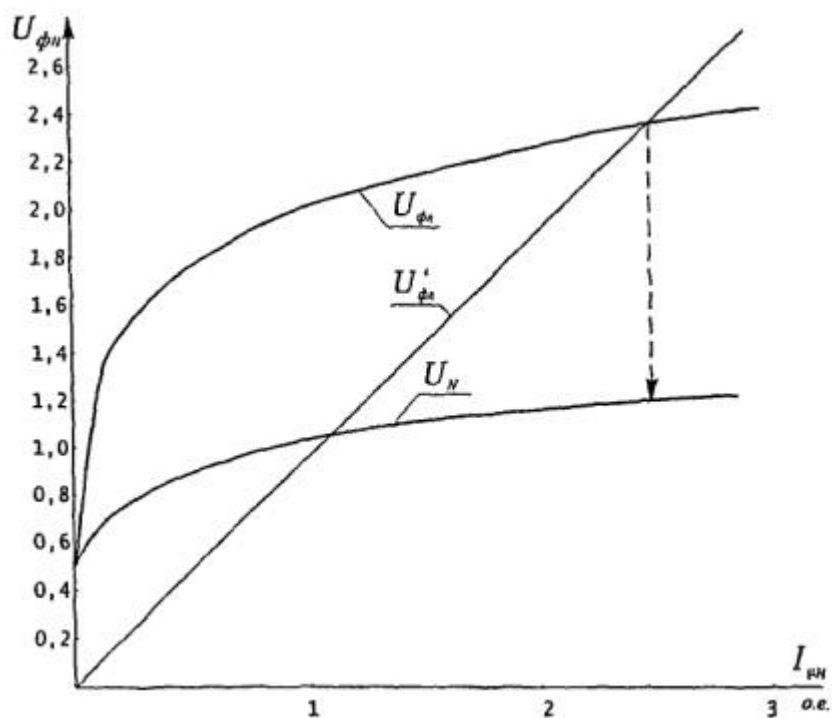


Рисунок 15 –Перенапряжения на линии и на нейтрали трансформатора при неполнофазном режиме линии 110 кВ с трансформатором с разомкнутой нейтралью

По двум точкам строят зависимость напряжения на емкости линии $U_{\text{фл}}'$, рассчитывая ее значения по формуле:

$$U_{\text{фл}}' = I_{\text{мн}} I_{\text{мн}}^* / YL U_{\text{фн}}, \text{ о.е.} \quad (32)$$

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

L - длина линии, км;

$I_{\text{мн}}$ - номинальный ток намагничивания трансформаторов, А;

$I_{\text{мн}}^*$ - номинальный ток намагничивания линии, о.е. по отношению к номинальному току трансформатора, о.е. - из рисунка 14;

$U_{\text{фн}}$ - номинальное напряжение трансформатора, кВ.

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

Эти перенапряжения могут существовать несколько часов. Поэтому по зависимостям «допустимые напряжения - время» для длительности 10000 сек (с учетом условий грозозащиты) определяют значение временно допустимого напряжения $U_{\text{вно}}$. Образец зависимости приведен на рисунке 12. Рекомендуется принимать $U_{\text{нр}} = 59$ кВ.

При установке ОПН на шинах РУ или их секциях с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями с достаточно большими величинами емкостей, шунтирующими их контакты (ВВБ, ВВБК, ВВБУ, ВВН, ВМТ), производят расчет резонансных резонансных U_y по формуле 33

$$U_{\text{остк}} = U_k - K_{\text{нн}} Z\lambda I_p \quad (33)$$

где $U_{\text{остк}}$ - остающееся напряжение на ограничителе при рассматриваемой коммутации;

$K_{\text{нн}}$ - коэффициент несимметрии, учитывающий неодновременность срабатывания ограничителей в различных фазах ($K_{\text{н}} = 1,2 - 1,3$);

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

I_p - разрядный ток через ограничитель;

U_k - неограниченное КП в сети принимают равным при отсутствии расчетов $3,5U_{\text{ф}}$.

Определенные выше величины квазиустановившегося напряжения (U_y) и соответствующие им длительности (t_y) следует сопоставить с характеристикой «повышение напряжения - время» для случая с «предварительным нагружением энергией» для выбранного типа ограничителя. Из всех выше перечисленных квазиустановившихся перенапряжений и их длительности выбирают наиболь-

шее U_y и соответствующее ему t_y , а также наибольшую длительность квазиустановившегося напряжения t_{y2} и соответствующее ей U_{y2} .

По зависимости «допустимое повышение напряжения - время» случая с «предварительным нагружением энергией» определяют для t_{y1} и t_{y2} соответствующие им значения T_{r1} и T_{r2} в соответствии со значениями U_{y1} и U_{y2} . (Значение $U_{вн}$ в относительных единицах). По ним рассчитывают значения номинального (или длительно допустимого рабочего напряжения) по формуле 34, 35

$$U_{н1} = U_{y1} / T_{r1}, \text{ кВ} \quad (34)$$

$$U_{н2} = U_{y2} / T_{r2}, \text{ кВ} \quad (35)$$

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

Величина коммутационного перенапряжения определяет значение остающегося напряжения на ОПН, которое должно быть при расчетном токе не менее чем на 15-20% ниже испытательного напряжения $U_{ки}$ коммутационным импульсом защищаемого оборудования (для оборудования со сроком эксплуатации выше 10 лет рекомендуется увеличить разницу до 30-40%).

$$U_{остк} \approx (1,15-1,2) U_{ки} \quad (36)$$

Если в паспорте данного защищаемого оборудования не оговорено специальное исполнение изоляции (например, облегченная), то уровень изоляции защищаемого оборудования принимается в соответствии ГОСТ-1516.3.

В ГОСТе -1516.3 испытательное напряжение коммутационного импульса дается только для оборудования 330 кВ и выше. Для электрооборудования 110-220 кВ нормируется одномоментное испытательное напряжение частоты 50 Гц ($U_{исп50}$). Выдерживаемый уровень коммутационных перенапряжений можно определить по формуле 37

$$U_{ки} = 1,41 * 1,35 * 0,9 * U_{исп50}, \text{ кВ} \quad (37)$$

Количество ОПН для защиты откоммутационных перенапряжений определяют по соотношению испытательного напряжения электрооборудования на коммутационном импульсе и остающегося напряжения ОПН при коммутационных перенапряжениях. Если одного ОПН недостаточно, то учитывают все ОПН рассматриваемого РУ данного класса напряжения, на которые воздействуют данные перенапряжения, с пропорциональным снижением тока через один ОПН.

Если рассматриваемый ОПН не удовлетворяет вышеперечисленным условиям, то выбирают другой ОПН с тем же значением $U_{но}$, но большего класса энергоемкости.

Особенно чувствительны к коммутационным перенапряжениям ТТ-330-750 кВ производства ЗЗВА. Завод рекомендует защищать высоковольтный изолированный вывод трансформатора тока ОПНом с $U_{нр} = 3\text{кВ}$.

Достаточность выбранных параметров ОПН определяют в условиях квазиустановившихся перенапряжений. Для этого определяют допустимую длительность для всех полученных для этой точки квазиустановившихся перенапряжений.

В случае оценочных расчетов времени существования квазиустановившихся перенапряжений по зависимости «допустимое повышение напряжения - время»:

- для случая «с предварительным нагружением энергетическим импульсом» для ОПН с удельной энергоемкостью не более 5 кДж/кВ (U_n);

- для случая «без предварительного нагружения» для ОПН с удельной энергоемкостью выше 6 кДж/кВ (U_n).

Если в течение 1 - 2 часов подряд возможно несколько коммутаций и появлений квазиустановившихся перенапряжений, происходит ускоренное сокращение ресурса ОПН. В этом случае временно допустимая длительность текущего воздействия определяется по формуле 38

$$t_{\text{допк}} = t_{\text{внок}} * (1 - \sum t_{\text{ук}} / t_{\text{допк}}), \text{ сек} \quad (38)$$

$t_{\text{допк}}$ - допустимое время текущего воздействия перенапряжения на ОПН;

$t_{\text{внок}}$ - нормируемое допустимое время текущего воздействия;

$t_{\text{ук}}$ - реальная длительность данного вида воздействия.

Выбранные значения номинального напряжения ОПН считается удовлетворительным, если выполняется следующее условие 39

$$t_{\text{вноі}} (t_{\text{допн}}) \geq t_{\text{уі}} \quad (39)$$

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

для обслуживаемых подстанций

$$t_{\text{вноі}} (t_{\text{допн}}) \geq 3600 \text{ сек} \quad (40)$$

для подстанций с постоянным дежурством персонала

$$t_{\text{вноі}} (t_{\text{допн}}) > 11000 \text{ сек} \quad (41)$$

При отсутствии характеристик «повышение напряжения - время», учитывая, что в соответствии со стандартом ГОСТ Р 52725 $U_{но} = 1,25 U_{нр}$, выбор можно произвести по упрощенной программе расчета в соответствии с данными, приведенными в таблице 17.

В относительных единицах $U_{нр}$ должно иметь допустимые кратности повышения напряжения не менее значений $K_{н-в}(T)$, приведенных в таблице 23, т.е. в именованных единицах для ОПН должно быть допустимо повышение напряжения не менее $K_{н-в}(T) * U_{нр}$

Таблица 23 - Допустимые кратности повышения напряжения в сети 110-750 кВ.

Длительность T приложения повышенного напряжения	Допустимая кратность $K_{н-в}(T)$ превышения напряжения на ОПН, не менее
0,1	1,50*/1,40**
1 с	1,43*/1,35**
10 с	1,37*/1,30**
100 с	1,31*/1,23**
1200 с	1,23*/1,15**
3600 с	1,19*/1,10**

Примечание: * - для случая без нагружения; ** - для случая с предварительным нагружением
кратность $K_{8/20}$ ограничения грозовых перенапряжений

- не более 2,1 для ОПН 3-35 кВ (при расчетном токе 5 кА, 8/20 мкс);
- не более 2,2 для ОПН 110-330 кВ (при расчетном токе 10 кА, 8/20 мкс);
- не более 2,1 для ОПН 500-750 кВ (при расчетном токе 20 кА, 8/20 мкс);

кратность $K_{30/60}$ ограничения коммутационных перенапряжений

- не более 1,8 для ОПН 3-220 кВ (при расчетном токе 500 А, 30/60 мкс);
- не более 1,8 для ОПН 330-750 кВ (при расчетном токе 1000 А, 30/60

мкс);

номинальный разрядный ток (форма 8/20 мкс)

- 10 кА для ОПН 3-220 кВ;
- 20 кА для ОПН 330-750 кВ;

импульс большого тока (форма 4/10 мкс)

- 65 кА для ОПН 3-220 кВ с током пропускной способности 400 А;
- 100 кА для ОПН 3-750 кВ с током пропускной способности 550 А и бо-

лее.

Расстановка ОПН в ОРУ определяется надежностью молниезащиты электрооборудования, прежде всего трансформаторов. Выбранный тип ОПН проверяют на возможность установки в ОРУ на расстоянии, обеспечивающем требуемую **ТКП-339** надежность молниезащиты защищаемого оборудования.

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

$$L_{опн} = L_{ра}(U_{исп} - U_{опн}) / (U_{исп} - U_{рв}), \quad (42)$$

где $U_{исп}$ - испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе (кВ);

$U_{опн}, U_{рв}$ - остающееся напряжение на ОПН и РВ при токе 10 (5) кА, (кВ);
 $L_{опн}$ - расстояние от защищаемого оборудования до ОПН, (м);
 $L_{рв}$ - расстояние от защищаемого оборудования до РВ, нормируемое **ТКП-339**, (м).

Допускается установка ОПН на место заменяемых разрядников, если значения $U_{опн}, U_{рв}$ при токе 10 кА отличаются не более, чем на 1,5 %.

При протекании через ограничитель тока грозовых перенапряжений на заземляющем устройстве РУ в месте его присоединения в ЗУ возникают напряжения $U_{зу}$, определяемое по формуле 43:

$$U_{зу} = I_p R_{зу}, \text{ кВ} \quad (43)$$

где I_p - ток через ОПН;

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

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

$R_{зу}$ должно быть измерено по методике, приведенной в СТП 09110.47.203-07.

Остающиеся напряжения при грозовых и коммутационных перенапряжениях

Остающиеся напряжения при импульсных токах в ОПН, возникающих при ограничении грозовых и коммутационных перенапряжений, являются важными характеристиками ОПН и указываются в каталоге производителя на так называемых «расчетных импульсных токах». Эти остающиеся напряжения могут быть определены через типовые кратности $K_{8/20}$ и $K_{30/60}$ ограничения грозовых и коммутационных перенапряжений соответственно.

Таблица 24 – Типовые кратности ограничений перенапряжений

Класс напряжения, кВ	110	220	330	500	750
Расчетный ток грозовых перенапряжений (импульс 8/20 мкс)	10	10	10	20	20
Расчетный ток коммутационных перенапряжений (импульс 30/60 мкс)	500	500	1000	1000	1000
$K_{8/20}$	2,3			2,2	
$K_{30/60}$	2,0			1,9	

В относительных единицах $2 \times U_{нр}$ амплитуды наибольшего рабочего напряжения ОПН должен иметь кратности ограничения перенапряжений не более

значений $K_{8/20}$ и $K_{30/60}$, указанных в таблице. Т.е. в именованных единицах ОПН должен иметь остающиеся напряжения при расчетных грозовых и коммутационных импульсных токах, соответственно, не более

$$(U_{\text{нро}} * \sqrt{2})K_{8/20} \quad (44)$$

$$(U_{\text{нро}} * \sqrt{2})K_{30/60} \quad (45)$$

Номинальный разрядный ток (форма 8/20 мкс) и импульс большого тока (форма 4/10 мкс). Достаточными являются приведенные в таблице 25 значения.

Таблица 25 – Номинальный разрядный ток и импульс большого тока.

Класс напряжения, кВ	110	220	330	500	750
Импульс 8/20 мкс с амплитудой, кА	10	10	10	20	20
Импульс 4/10 мкс с амплитудой, кА	65-100	65-100	100	100	100

По зоне загрязнения атмосферы в месте установки ОПН выбирается нормируемый путь утечки для данного типа и конструкции ОПН в соответствии с ГОСТ 9920. Удельная длина пути утечки для ОПН выбирается не менее чем на 20% выше, чем для остального оборудования ОРУ.

Ограничители опорного исполнения должны выдерживать механические нагрузки:

- от ветра со скоростью 30 м/с;
- от ветра со скоростью 15 м/с при гололеде с толщиной стенки льда до 20 мм;
- от натяжения проводов в горизонтальном направлении не менее 600 Н для ОПН – 110-330 кВ и 1000 Н для ОПН – 750 кВ.

Особенности выбора ОПН по условиям работы в ОРУ электростанций.

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

Расчетным при этом является случай однофазного КЗ на шинах или вблизи от них на отходящих линиях. При этом под воздействием АРВ и форсировки возбуждения резко возрастает ток возбуждения ротора и, соответственно, внутренняя ЭДС генератора и напряжение на выводах трансформаторов и шинах ОРУ. При этом если генератор еще не отключился от сети, то напряжение на неповрежденных фазах ошиновки трансформаторов РУ находится в пределах $1,1 - 1,2U_{\phi}$, а после отключения блочного трансформатора или всех линий становится равным ЭДС.

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

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

Аналогичная ситуация может возникнуть при резервировании линейного выключателя генераторным.

16. Выбор характеристик ОПН 110-750 кВ в особых случаях

Для корректного выбора схем расстановки и технических характеристик ОПН в сетях 110-750 кВ необходимо проведение расчетов в «особых» случаях, приведенных ниже. Расчеты могут быть выполнены аналитически или с использованием компьютерного моделирования процессов.

РУ с присоединенными ВЛ750кВ длиной более 200-300км

Проведение расчетов внутренних перенапряжений на ВЛ 750 кВ длиной более 200-300 км и в РУ 750кВ, к которым эти ВЛ присоединены, необходимо с целью:

- определения квазистационарных перенапряжений и оценки их опасности для оборудования и, в частности, для ОПН;
- определения комплекса мер, направленных на снижение квазистационарных перенапряжений в тех случаях, когда они представляют реальную опасность для оборудования; например такие опасные перенапряжения резонансной природы могут возникать в цикле ОАПВ на отключенной фазе линии «резонансной» длины, зависящей от числа присоединенных к ней шунтирующих реакторов;
- определения энергии, которая выделяется в ОПН при коммутационных перенапряжениях.

Блочные и полублочные передачи 110-750 кВ

Схемами, в которых возможно возникновение опасных внутренних перенапряжений, являются так называемые блочные и полублочные передачи, в которых воздушная линия коммутируется вместе с силовым трансформатором или автотрансформатором. В проектной практике следует избегать блочных и полублочных схем как опасных для оборудования и, в частности, для ОПН, однако ряд таких электропередач уже эксплуатируется и

требует проведения расчетов в рамках замены устаревших вентильных разрядников на ОПН.

Проведение расчетов внутренних перенапряжений в блочных и полублочных передачах необходимо с целью:

- определения квазистационарных перенапряжений и оценки их опасности для оборудования и, в частности, для ОПН;
- определения комплекса мер, направленных на снижение квазистационарных перенапряжений в тех случаях, когда они представляют реальную опасность для оборудования;
- определения энергии, которая выделяется в ОПН при коммутационных перенапряжениях.

Следует понимать, что в блочных и полублочных передачах наибольшее рабочее напряжение ОПН, обеспечивающее его надежную эксплуатацию при квазистационарных перенапряжениях, может оказаться заметно выше фазного значения наибольшего рабочего напряжения сети, т.е. такой ОПН в ряде случаев будет неэффективно ограничивать грозовые и коммутационные перенапряжения на оборудовании.

В качестве примера на рисунке ниже приведена достаточно редко встречающаяся схема полублочной передачи 750/330 кВ, в которой воздушная линия 500 кВ может коммутироваться в блоке с автотрансформатором 750кВ/500кВ выключателями 750 кВ.

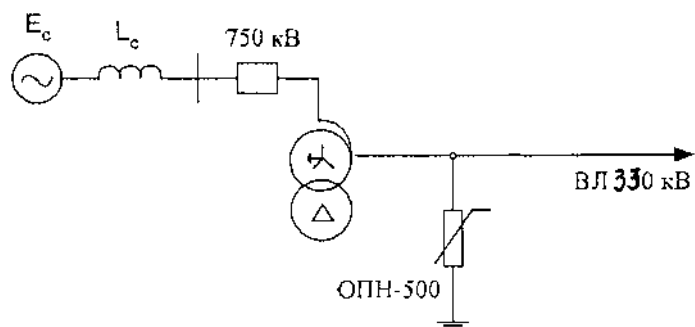


Рисунок 16 – Схема полублочной передачи 750/330 кВ.

Значительно более распространенными являются полублочные передачи 110-220 кВ, в которых понижающие трансформаторы (110-220)/(6- 10) кВ не имеют собственных выключателей 110-220 кВ и коммутируются вместе с питающими ВЛ 110-220 кВ - это, как правило, тупиковые подстанции, транзитные подстанции, подстанции на отпайках, питаемые по ВЛ 110-220 кВ длиной до 40-50 км. Нейтрали трансформаторов 110-220 кВ на таких подстанциях зачастую разземлены.

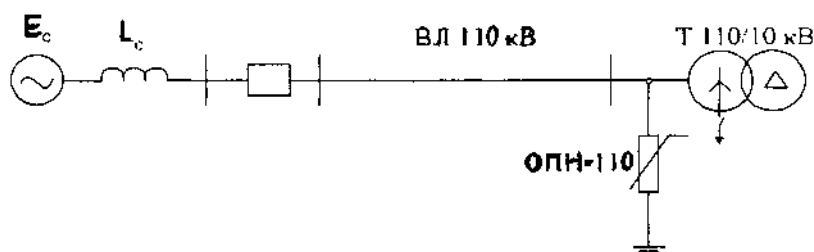


Рисунок 17 - Схема полублочной передачи 110 кВ

Основные характеристики ОПН для полублочных передач 110-220 кВ, определенные расчетным путем и проверенные опытом эксплуатации таковы:

- наибольшее рабочее напряжение ОПН 110-220 кВ принимается на 20% выше наибольшего рабочего (фазного) напряжения сети и приведено в таблице 26.

Таблица 26 - Наибольшее рабочее напряжение ОПН 110-220 кВ

Класс напряжения, кВ	110	220
$U_{\text{про}}$, кВ	88	176

В типовых схемах питания тяговых подстанций переменного тока 27,5 кВ в случае возникновения короткого замыкания на питающих воздушных линиях с их последующим отключением выделяется участок сети с изолированной нейтралью, что является нарушением требований ТКП 339.

Наличие присоединенного к ТПС выделенного участка питающей сети с изолированной нейтралью при определенных обстоятельствах приводит к

«обратной трансформации» на него напряжения из контактной сети 27,5 кВ, что вызывает в ряде случаев опасные для изоляции оборудования квазистационарные и коммутационные перенапряжения.

Для исключения повреждений оборудования в схемах питания тяговых подстанций переменного тока 27,5 кВ рекомендуется:

- по возможности заземлять нейтрали силовых трансформаторов на ТПС;

- заменить вентильные разрядники 110-220 кВ на нелинейные ограничители перенапряжений, наибольшее рабочее напряжение которых $U_{нр}$ на 20% больше фазного значения наибольшего рабочего напряжения сети, а удельная поглощаемая энергия одного импульса $w_{уд} \geq 4$ кДж/кВ;

- обеспечить координацию действий релейных защит электрических сетей общего назначения и системы электроснабжения электрифицированных железных дорог;

- при коротком замыкании в питающей сети отключать рабочий трансформатор ТПС от тяговой сети 27,5 кВ (например, выключателем на стороне 27,5 кВ) до выделения изолированного участка питающей сети 110-220 кВ.

Перечисленные меры обладают различной эффективностью и возможностью реализации.

17. Защита от грозовых перенапряжений изоляции ВЛ 110-750 кВ

В ряде случаев, в силу объективных причин (высокие значения сопротивления заземления опор ВЛ из-за высокого удельного сопротивления грунта, невозможность применения грозозащитных тросов из-за высоких ветрогололедных нагрузок и т.п.) традиционные средства грозозащиты не могут обеспечить необходимую грозоупорность ВЛ. В таких случаях дополнительным, дорогим, но эффективным способом повышения грозоупорности ВЛ может стать установка ОПН на опорах ВЛ для защиты ее изоляции от перекрытий.

Подвесные ограничители перенапряжений ОПН 110-750 кВ устанавливаются на опорах ВЛ 110-750 кВ параллельно гирляндам линейных изоляторов, т.е. между фазным проводом и траверсой опоры. При этом используются два способа подключения ОПН:

- без искрового промежутка;
- через искровой промежуток (не путать с вентильным разрядником).

На основе ряда расчетов для ВЛ 110-750 кВ, сделаны следующие обобщающие рекомендации относительно мест установки ОПН,

согласующиеся с зарубежным опытом применения ОПН на ВЛ:

- для эффективной защиты изоляции всей ВЛ от грозовых перенапряжений необходима установка ОПН на каждой опоре;

- для эффективной защиты изоляции отдельных («проблемных») опор ВЛ от грозовых перенапряжений необходима установка ОПН только на этих опорах;

- для снижения числа грозовых отключений, вызванных прорывами молнии на фазные провода, наиболее эффективно устанавливать защитные ОПН в верхние фазы (при вертикальном расположении или расположении проводов в «треугольник») и в крайние фазы (при горизонтальном расположении проводов);

- для снижения числа грозовых отключений, вызванных обратными перекрытиями изоляции с опоры на фазные провода, установка ОПН наиболее эффективна в крайние фазы ВЛ с горизонтальным расположением проводов, а на ВЛ с иным расположением проводов - в зависимости от сопротивлений заземления опор (при малых сопротивлениях заземления - в верхние фазы, а при больших сопротивлениях заземления - в нижние фазы);

- для исключения перекрытий изоляции на одноцепной опоре необходима установка ОПН сразу во все фазы на опоре;

- для исключения двухцепных перекрытий изоляции на двухцепных опорах установка ОПН достаточна только в фазы одной из цепей.

При установке ОПН на ВЛ 110-750 кВ важнейшим является вопрос о выборе его энергоемкости $w_{уд}$, достаточное значение которой существенно зависит от следующих факторов:

- от вероятности прорыва молнии на фазный провод, на котором установлен ОПН, а также от статистических параметров разряда молнии;

- от сопротивления заземления опоры ВЛ, на которой установлен(ы) ОПН;

- от числа фаз ВЛ на опоре, в которые установлены ОПН;

- от наличия ОПН, расположенных в той же фазе на соседних опорах;

- от типа ОПН (с искровым промежутком или без него).

Определение энергоемкости ОПН в каждом конкретном случае производится по результатам технико-экономических расчетов.

Наибольшее рабочее напряжение ОПН ($U_{про}$), устанавливаемых на ВЛ 110- 750 кВ, зависит от типа ОПН (с искровым промежутком или без него). В случае ОПН без искрового промежутка наибольшее рабочее напряжение ОПН выбирается как в типовых случаях (или как в особых случаях, если есть их признаки: большая длина ВЛ, возможность коммутации ВЛ одновременно с

трансформатором, др. признаки). В случае ОПН с искровым промежутком рабочее напряжение ОПН выбирается исходя из условий обеспечения надежного гашения дуги от тока промышленной частоты, который протекает в промежутке после его срабатывания от грозовых перенапряжений.

18. Защита от перенапряжений КРУЭ 110-750 кВ

Вольт-секундная характеристика элегазовой изоляции существенно отличается от вольт-секундной характеристики воздушной и бумажно-масляной. У элегазовой изоляции нет упрочнения изолирующих свойств при малых временах воздействия перенапряжений. Поэтому для оборудования с элегазовой изоляцией основную опасность представляют грозовые перенапряжения (микросекундные фронты) и высокочастотные перенапряжения (наносекундные фронты).

Источником грозовых перенапряжений является поражение молнией присоединенных воздушных линий. Источником высокочастотных - коммутации разъединителями и выключателями коротких участков шин внутри КРУЭ. Высокочастотные перенапряжения не связаны со спецификой отдельных случаев использования КРУЭ, а являются следствием свойств самого КРУЭ, его конструкции. Защита от этого вида перенапряжений предусматривается заводом изготовителем КРУЭ.

Выбор защиты от грозовых (и коммутационных) перенапряжений КРУЭ (а также присоединенных к нему силовых и измерительных трансформаторов, кабелей) осуществляется на стадии проектирования. В качестве защитных аппаратов применяются ОПН обычного типа (с воздушной изоляцией) или ОПН с элегазовой изоляцией (сокращенно ОПНЭ).

В случае защиты КРУЭ от перенапряжений необходимо проведение оценок и расчетов, которые позволят решить следующие задачи:

- принимая во внимание высокую стоимость КРУЭ, обосновать места установки ОПН, обеспечивающие надежную защиту изоляции КРУЭ от грозовых и коммутационных перенапряжений;
- выбрать тип защитного аппарата (ОПН или на порядок более дорогой ОПНЭ);
- выбрать характеристики ОПН и/или ОПНЭ.

Выбор характеристик ОПН и ОПНЭ, устанавливаемых для защиты КРУЭ, производится как в типовых случаях (или как в особых случаях, если есть их признаки: большая длина ВЛ, возможность коммутации ВЛ одновременно с трансформатором, др. признаки).

Защита КРУЭ от резонансных и низкочастотных коммутационных

перенапряжений осуществляется применением ограничителями перенапряжений типа ОПН и ОПНЭ.

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

Резонанс перенапряжения должен рассчитываться с учетом диапазона случайных годовых колебаний реактивного сопротивления питающей системы и нелинейности характеристик намагничивания силовых трансформаторов. Все виды резонансных перенапряжений чувствительны к активным потерям, короне на проводах, нагрузкам и т.д.

В отличие от коммутационных и грозовых перенапряжений защита от которых состоит в ограничении их амплитуды, защита от резонансных перенапряжений должна быть направлена на то, чтобы полностью исключить возможность возникновения резонансных перенапряжений, либо, если это оказывается экономически нецелесообразно, создать такие условия, при которых величина и длительность перенапряжений становится безопасной для оборудования. Допустимое повышение напряжения промышленной частоты приведено в таблице 27.

Таблица 27 - Допустимое повышение напряжения промышленной частоты на оборудовании 110-330 кВ.

Оборудование	Допустимое повышение напряжения при длительности воздействия, с			
	1200	20	1	0,1
Силовые трансформаторы и автотрансформаторы	1,1 1,1	1,25 1,25	1,9 1,5	2,0 1,58
Шунтирующие реакторы и электромагнитные трансформаторы напряжения	1,15 1,15	1,35 1,35	2,0 1,5	2,1 1,58
Коммутационные аппараты, емкостные ТН	1,15	1,6	2,20	2,40
Трансформаторы тока, конденсаторы связи, шинные опоры	1,15	1,6	1,7	1,8

Если все элементы КРУЭ и встроенного оборудования выдержали испытания в соответствии с ТКП – 339, а внешний по отношению к КРУЭ комплекс защитных мер и аппаратов ограничивает воздействия:

– на изоляцию «воздух-элегаз», воздушных присоединений, силовых и измерительных трансформаторов 110, 220, 330, 750 кВ соответственно до 73,

146, 257, 560 кВ;

– на ОПН,

то система защиты от резонансных перенапряжений достаточна.

Защита от низкочастотных коммутационных перенапряжений, действующих на изоляцию оборудования ПС, в состав которой входят подходы присоединений ВЛ, вводы «воздух-элегаз», измерительные трансформаторы, установленные на опоре ВЛ, компенсационные реакторы, элегазовые выключатели, разъединители, шинопроводы, осуществляется ОПН и ОПНЭ. Защитные характеристики ОПН и ОПНЭ должны быть одинаковы. Если общее число ОПН и ОПНЭ, установленных как в самом КРУЭ, так и на всех входящих и отходящих присоединениях $n = n_{\text{опн}} + n_{\text{опнэ}}$, то амплитуда действующих на оборудование ПС и газонаполненные элементы КРУЭ низкочастотных коммутационных перенапряжений определяется неравенством:

$$k_{\text{возд}} \geq k_{\text{защ}}/n^{0,04}, \text{ кВ} \quad (46)$$

Если рассчитанное по формуле 46 $k_{\text{возд}}$ превышает $k_{\text{доп}}$, приведенные в таблице 28, то число РПН увеличивают до $n_{\text{опн}}' > n_{\text{опн}}$ при котором выполняется условие 47

$$k_{\text{возд}} = k_{\text{защ}}/(n_{\text{опн}}' + n_{\text{опнэ}})^{0,04} \leq k_{\text{доп}}, \text{ кВ} \quad (47)$$

Таблица 28 – Допустимый уровень низкочастотных перенапряжений

U_n , кВ	330	750
$k_{\text{доп}}$, кВ	950	1425

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

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

$$R_{\text{пр}} \geq 2Z_w, \text{ Ом} \quad (48)$$

где Z_w – волновое сопротивление коммутируемого разъединителем участка шинпровода.

Предвключаемый резистор должен быть термостойким, т.е. поглощать без повреждения энергию, выделяющуюся в нем во время коммутации и не должен нарушать общего температурного режима элегазового разъединителя.

Использование элегазового разъединителя с предвключаемым резистором решает также задачу уменьшения импульсных помех, решая задачу по магнитной совместимости. Величина импульсных помех прямо пропорциональна амплитуде высокочастотных перенапряжений.

Грозоупорность элегазовых КРУЭ достигается снижением числа набегающих волн за счет повышения грозоупорности ВЛ на подходе к КРУЭ (снижение сопротивления заземления опор), повышение эффективности тросовой защиты, установкой ОПН в месте перехода с воздушной линии на кабель. Выбор параметров этих ОПН изложен выше.

Если присоединение ВЛ к КРУЭ производится кабелем или элегазовым токопроводом при длине кабеля или токопровода более 100 м и их присоединение к шинам КРУЭ через разъединитель, перед разъединителем устанавливают дополнительный ОПН с таким же остающимся напряжением.

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

19. Мультиградиентный ОПН

Серьезной проблемой, требующей решения при создании и эксплуатации ОПН, является устранение неравномерности распределения температуры вдоль колонки варисторов, вызванной:

- для ОПН 6-35 кВ неравномерностью охлаждения колонки варисторов, обусловленной различной теплоотдачей в радиальном (через боковую поверхность) и аксиальном (через металлические фланцы) направлениях;

- для ОПН 110-750 кВ неравномерностью распределения напряжения вдоль колонки варисторов, обусловленной резкой неравномерностью электрического поля, в которое помещается ОПН.

Выравнивание распределения температуры вдоль колонки варисторов 6-750 кВ реализовано в уникальном не имеющем аналогов защитном аппарате нового поколения - мультиградиентном ограничителе перенапряжений нелинейном МОПН6-750 кВ, защищенном Патентом РФ.

Выравнивание распределения температуры вдоль колонки варисторов ограничителей 6-35 кВ в настоящее время достигнуто лишь в конструкции

МОПН.

Выравнивание распределения температуры вдоль колонки варисторов 110- 750 кВ различных изготовителей в определенной степени достигается применением традиционных торроидальных экранов, установка которых направлена на устранение причины возникающей неравномерности, т.е. основана на обеспечении равномерности электрического поля вдоль колонки варисторов за счет перераспределения величин емкостей варисторов на землю и на фазный провод. Вместе с тем, наличие экранов заметно снижает расстояние от верхнего фланца ОПН до заземленных конструкций. Снижение отмеченного габарита еще допустимо на высоте до 1000 метров над уровнем моря, но уже опасно на более возвышенных территориях, для которых характерно пониженное давление, а значит - снижение разрядных характеристик изоляции и увеличение риска перекрытия ОПН (с экраном) по поверхности. В компактизированных закрытых распределительных устройствах в большинстве случаев применение экранов типовой конструкции и вовсе невозможно. Вместе с тем, конструкция мультиградиентного ограничителя перенапряжений нелинейного МОПН 110-750 кВ позволяет эффективно решать задачу выравнивания распределения температуры вдоль колонки варисторов даже при отказе от торроидальных экранов.

МОПН 6-750 кВ, разработанный как защитный аппарат для особо тяжелых условий работы, может быть эффективно использован в обычных условиях с существенным увеличением надежности.

20. Защита от перенапряжений изоляции « экран-земля» однофазных кабелей высокого напряжения

В последнее время силовые кабели высокого напряжения 6-330 кВ все более широко используются для передачи и распределения электроэнергии, особенно в крупных городах и на промышленных предприятиях, где уровень электропотребления и плотность нагрузки весьма значительны. Наибольшее распространение получают силовые однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Экраны кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена выполнены из хорошо проводящего материала (алюминия или меди); заземление экранов более чем в одной точке ведет к появлению в них значительных токов, сопоставимых с током жилы кабеля. Если по условиям ограничения напряжения на экране обязательно его заземление в нескольких точках, то для снижения токов в экранах при трехфазной группе однофазных кабелей может быть применена транспозиция экранов.

Установка ОПН между экраном и землей для защиты изоляции «экранный-земля» кабелей 110-330 кВ (реже - кабелей 6-35 кВ) от грозовых перенапряжений необходима:

- на том конце кабеля, на котором экран не заземлен;
- если применена транспозиция экранов трехфазной группы кабелей, то в каждом узле транспозиции.

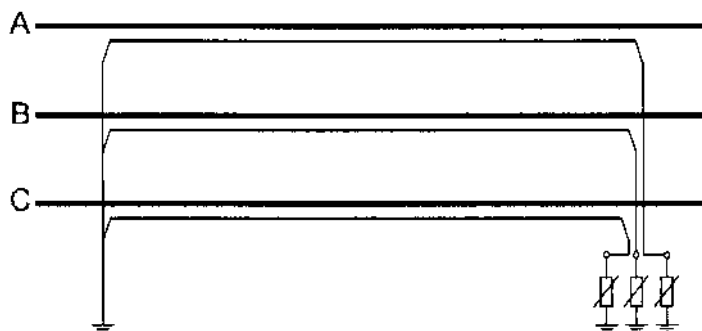


Рисунок 18 - Схема соединения экранов группы из трех однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в случае, когда экран заземлен только с одной стороны.

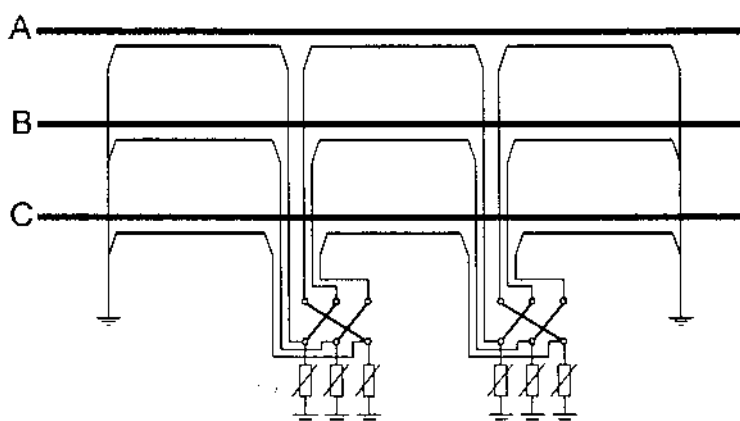


Рисунок 19 - Схема соединения экранов группы из трех однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в случае, когда экран заземлен с двух сторон и применен один цикл транспозиции экранов.

Экраны кабелей 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена нельзя заземлять в двух точках. Заземление экрана должно быть выполнено в центре нагрузки (у потребителя).

Характеристики ОПН, предназначенного для защиты изоляции экрана кабеля, должны выбираться из следующих критериев:

- обеспечения надежной защиты изоляции экрана при грозовых и коммутационных перенапряжениях с учетом, что испытательное напряжение изоляции экрана – 10 кВ постоянного тока;
- обеспечения надежной работы ОПН при воздействии на него напряжения промышленной частоты, как в нормальном режиме, так и в аварийном ре-

жиме короткого замыкания вне кабеля. Наиболее тяжелым для изоляции экрана является режим ОЗЗ на двух фазах.

21. Схемно – режимные мероприятия по повышению надежности работы ОПН

Если в нормальных режимах работы сети ее наибольшее рабочее напряжение может превышать наибольшее рабочее напряжение ОПН, обеспечить условия его работы можно следующим образом:

- переключением РПН (регулирование напряжения под нагрузкой) трансформатора (автотрансформатора) с целью постоянного снижения напряжения на той его обмотке, где относительное повышение напряжения по отношению к номинальному выше, что эффективно при соизмеримых индуктивных сопротивлениях примыкающих систем. В сети 6-10 кВ для этой цели возможно применение линейных трансформаторов. Такое регулирование целесообразно проводить летом, при спаде нагрузок;

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

- в нейтрали шунтирующих реакторов 750 кВ, установленных на ВЛ, при установке ОПН-750 с удельной энергоемкостью ниже 7 кДж/кВ номинального напряжения ОПН, необходимо устанавливать компенсационный реактор, шунтированный выключателем и ОПН 35 кВ, с соответствующей релейной защитой и автоматикой. РЗА отключает шунтирующий выключатель при увеличении стока реактивной мощности с ВЛ.

22. Типовые и особые случаи применения ОПН 110-750 кВ

Для корректного выбора схем расстановки и технических характеристик ОПН 110-750 кВ необходимо проведение расчетов:

- внутренних перенапряжений на РУ, к которым присоединены ВЛ- 750 кВ длиной более 200-300 км:

- внутренних перенапряжений на РУ 110-750 кВ, на которых у силовых трансформаторов и автотрансформаторов не установлены выключатели на стороне высокого напряжения (в блочных и полублочных схемах); на практике следует избегать таких схем, как потенциально опасных для оборудования с точки зрения возникающих внутренних перенапряжений, что снимет необходимость проведения расчетов;

– внутренних перенапряжений на электропередачах, оснащенных устройствами продольной компенсации (УПК);

– внутренних перенапряжений в схемах электроснабжения тяговых подстанций переменного тока 27,5 кВ от сетей 110-220 кВ;

– внешних (грозовых) перенапряжений на ВЛ 110-750 кВ, не обладающих достаточной грозоупорностью, с целью определения необходимости установки ОПН на ВЛ, числа и мест их первоочередного размещения на ВЛ, выбора типа ОПН и основных его характеристик;

– перенапряжений в распределительных устройствах 110-750 кВ с элегазовой изоляцией (КРУЭ);

– перенапряжений в разземляемой нейтрали 110-220 кВ силовых трансформаторов 110-220 кВ.

В остальных случаях в проведении специальных расчетов перенапряжений нет необходимости, а выбор схемы защиты оборудования и характеристик ОПН может быть произведен упрощенно.

Для защиты от грозовых перенапряжений в сетях 110-750 кВ обязательно устанавливать ОПН:

– на стороне 110-750 кВ силовых трансформаторов (автотрансформаторов, шунтирующих реакторов) для защиты от грозовых перенапряжений, вызванных грозовыми волнами, набегающими с присоединенных ВЛ 110-750 кВ; не допускается наличие коммутационных аппаратов в цепи между трансформатором (автотрансформатором, шунтирующим реактором) и защитным аппаратом;

– вне посредственной близости от кабельных муфт 110-750 кВ в местах их присоединения к ВЛ или к ошиновке РУ;

рекомендуется дополнительно устанавливать ОПН:

– на каждой присоединенной ВЛ в непосредственной близости от РУ (например, на ближайшей к РУ опоре ВЛ) или на сборные шины РУ.

Размещение защитных аппаратов в РУ 110-750 кВ должно быть таким, чтобы расстояния до оборудования не превосходили максимально допустимых.

Эти расстояния приведены в ТКП-339 в табличном виде для случая защиты оборудования при помощи вентильных разрядников и выполнения специальных требований к обустройству защищенных тросами подходов ВЛ. В случае использования вместо разрядников современных ОПН максимально допустимые расстояния и требования к защищенным подходам могут быть скорректированы.

Исследования позволяют сделать ряд выводов и предложений,

дополняющих требования ТКП-339 редакции в части защиты от грозových перенапряжений оборудования РУ и обустройства защищенных подходов:

- как высокоэффективный способ защиты оборудования от грозových (и коммутационных) перенапряжений должны быть рекомендованы к использованию каскадные схемы, в которых защитные аппараты установлены на каждой присоединенной ВЛ 110-750 кВ вблизи от входа РУ («в линейной ячейке»);

- приведенные в таблицах ТКП-339 максимально допустимые расстояния от оборудования до защитных аппаратов указаны при грозовой активности не более 30 грозových часов в год; в случае, если число грозových часов в районе расположения более 30 или менее в год, допустимые расстояния должны быть пропорционально скорректированы;

- при замене разрядников на ОПН разрешается пересчитывать приведенные в таблицах максимально допустимые расстояния от защитных аппаратов до силовых трансформаторов, автотрансформаторов;

- нельзя пересчитывать максимально допустимые расстояния от защитных аппаратов до наиболее удаленного оборудования РУ (оборудования линейных ячеек), расположенного до защитных аппаратов (РВ или ОПН) по ходу набегающих с присоединенных ВЛ грозových волн;

- необходимо исключить примечание к ТКП-339, допускающее не ограничивать расстояния до удаленного оборудования при большом числе присоединенных ВЛ 110, 150, 220 кВ; при большом числе ВЛ в качестве максимально допустимых расстояний от защитных аппаратов до удаленного оборудования можно принять те расстояния по ТКП-339, которые указаны при трех и более постоянного включенных ВЛ 110, 150, 220 кВ;

- допускается снижать длину тросового подхода ВЛ по сравнению со значениями, указанными в ПУЭ, в случае установки дополнительных ОПН в ее линейную ячейку;

- в случае повышенных (более величины 20 Оммаксимально) сопротивлений заземления опор ВЛ 110-330 кВ на подходах к РУ необходимо устанавливать дополнительные ОПН 110-330 кВ, размещаемые в линейные ячейки ВЛ или на сборные шины РУ.

23. Примеры применения ОПН

На рисунках приведены два характерных примера, для которых с использованием настоящих Рекомендации предложены места установки ОПН и их основные технические характеристики.

При выборе характеристик ОПН необходимо обратить внимание на сле-

дующие особенности двух предлагаемых схем:

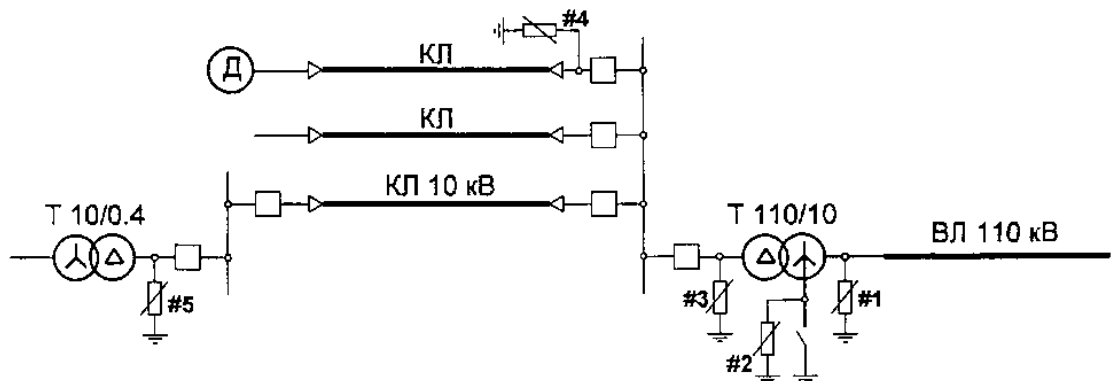


Рисунок 20 – Установка ОПН на подстанции 110 кВ

- на стороне 110 кВ силового трансформатора 110/10 кВ нет выключателя, т.е. он коммутируется в полублоке с питающей ВЛ 110 кВ, что является особым случаем применения ОПН 110 кВ;
- нейтраль трансформатора Т 110/10 кВ нормально разземлена, т.е. требует защиты от перенапряжений, что является особым случаем применения ОПН;
- несмотря на то, что выключатели вакуумные, коммутационные перенапряжения при их работе могут быть опасны лишь для двигателя 10 кВ и трансформатора 10/0.4 кВ; поэтому установка ОПН требуется далеко не во все ячейки выключателей 10 кВ, а лишь со стороны коммутируемого присоединения в ячейки двигателя и трансформатора 10/0,4;

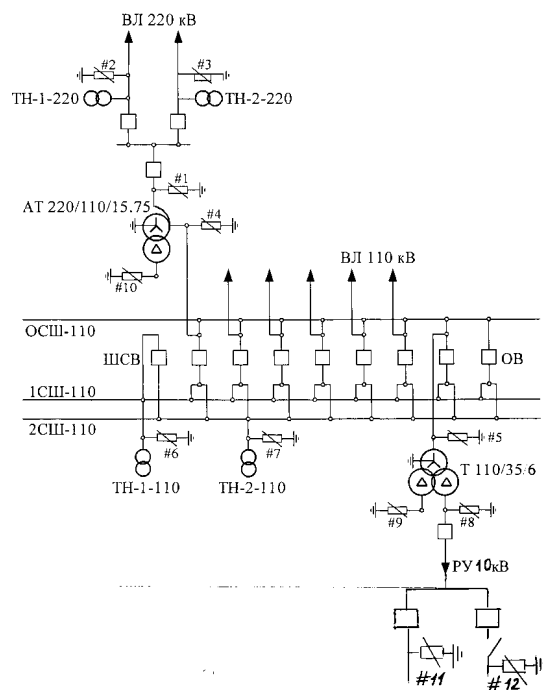


Рисунок 21 - Установка ОПН на подстанции 220 кВ

- нейтраль трансформатора 110/35/6 заземлена и не требует защиты от перенапряжений;
- обмотки 35 кВ силового трансформатора и 15,75 кВ автотрансформатора не используются, т.е. являются холостыми; они требуют защиты от грозовых перенапряжений, но это не является особым случаем применения ОПН;
- измерительные трансформаторы напряжения 220 кВ установлены на ВЛ 220 кВ и требуют защиты от грозовых перенапряжений, для чего необходима установка на ВЛ вблизи от входа РУ 220 кВ защитных ОПН 220 кВ, которые совместно с ОПН 220 кВ у автотрансформатора образуют каскадную схему;
- измерительные трансформаторы напряжения 110 кВ, учитывая большое количество присоединенных ВЛ 110 кВ, установлены только на сборных шинах 110 кВ; по этой причине установка ОПН 110 кВ на каждую присоединенную ВЛ 110 кВ вблизи от входа РУ не обязательна, а достаточно установить ОПН 110 кВ лишь на сборные шины (в дополнение к ОПН у силового трансформатора).

В Рекомендациях указан диапазон токов пропускной способности, который является достаточным в тех или иных случаях. При выборе конкретной величины тока пропускной способности $I_{\text{п}}$ из предлагаемого диапазона значений следует принимать во внимание следующее:

- если в РУ установлено большое количество ОПН, то ток пропускной способности каждого ОПН может быть принят минимальным из диапазона значений, указанных в Рекомендациях (так как в РУ 110 кВ установлено одновременно четыре комплекта ОПН, то достаточно принять $I_{\text{п}} = 400$ А);
- у неиспользуемых обмоток трансформаторов и автотрансформаторов всегда установлен лишь один комплект ОПН, поэтому величину $I_{\text{п}}$ лучше принять ближе к максимальному из диапазона значений, указанных в Рекомендациях (для защиты обмотки 35 кВ и обмотки 15,75 кВ лучше принять $I_{\text{п}} = 550$ А);
- чем меньше наибольшее рабочее напряжение ОПН по сравнению с типовыми значениями, указанными в Рекомендациях, тем ниже по напряжению вольтамперная характеристика такого ОПН и, при тех же уровнях неограниченных перенапряжений, больше будут импульсные токи в нем (поэтому для ОПН - рисунок 17- рекомендуется ток пропускной способности 550 А, а не 400 А, как у других ОПН в сети 10 кВ).

В таблицах 29, 30 приведены рекомендуемые места установки ОПН в схемах рисунков 20, 21.

Таблица 29 - Места установки и рекомендуемые типы ОПН в схеме подстанции 110 кВ

№	Место установки ОПН	Назначение ОПН
1	У выводов 110 кВ трансформатора 110/10 кВ	Защита обмотки 110 кВ трансформатора от грозовых (и коммутационных) перенапряжений
2	У вывода нейтрали 110 кВ трансформатора 110/10 кВ	Защита изоляции нейтрали 110 кВ от грозовых перенапряжений
3	У выводов 10 кВ трансформатора 110/10 кВ	Защита обмотки 10 кВ трансформатора от грозовых перенапряжений
4	В ячейке 10 кВ выключателя со стороны коммутируемого двигателя	Защита двигателя от коммутационных (и грозовых) перенапряжений
5	Или у выводов 10 кВ трансформатора 10/0,4, или в ячейке 10 кВ выключателя со стороны этого трансформатора	Защита обмотки 10 кВ трансформатора 10/0,4 от коммутационных (и грозовых) перенапряжений

Таблица 30 - Места установки и рекомендуемые типы ОПН в схеме подстанции 220/110 кВ

№	Место установки ОПН	Назначение ОПН
1	У выводов 220 кВ автотрансформатора	Защита обмотки 220 кВ автотрансформатора от грозовых (и коммутационных) перенапряжений
2	На ВЛ 220 кВ вблизи от входа РУ 220 кВ	Каскадный принцип защиты оборудования РУ 220 кВ от грозовых перенапряжений, обеспечивающий высокую защищенность изоляции автотрансформатора; защита от грозовых (и коммутационных) перенапряжений ТН на ВЛ
3	У выводов 110 кВ автотрансформатора	Защита обмотки 110 кВ автотрансформатора от грозовых (и коммутационных) перенапряжений
4	У выводов 110 кВ трансформатора	Защита обмотки 110 кВ трансформатора от грозовых (и коммутационных) перенапряжений
5	У измерительных трансформаторов напряжения 110 кВ	Защита обмотки 110 кВ измерительных трансформаторов от грозовых (и коммутационных) перенапряжений
6	У выводов 6 кВ трансформатора	Защита обмотки 6 кВ трансформатора от грозовых перенапряжений
7	У неиспользуемых выводов 35 кВ трансформатора	Защита обмотки 35 кВ трансформатора от грозовых перенапряжений
8	У неиспользуемых выводов 15,75 кВ автотрансформатора	Защита обмотки 15,75 кВ автотрансформатора от грозовых перенапряжений
9	ВЛ – 10 кВ	Защита СШ-10 от волн, набегающих с ВЛ
10	ВЛ – 10 кВ	Защита «нормального разрыва»

24. Эксплуатация ОПН

Перед монтажом ОПН необходимо произвести:

- внешний осмотр ОПН;
- измерение сопротивления ОПН мегаомметром напряжением 2,5 кВ при повышенной влажности окружающего воздуха измерение необходимо вести с применением экрана; при этом величина сопротивления не должна отличаться

более чем на 30% от величин, приведенных в паспорте и должно быть не менее 3000 мОм;

– после монтажа ОПН до включения под напряжение необходимо произвести измерение тока проводимости для ОПН 110 кВ при напряжении 73 кВ 50 Гц, остальные ОПН – 100 кВ 50 Гц. При отсутствии соответствующего оборудования допускается производить измерение токопроводимости ОПН 220 кВ при напряжении 75 кВ. При этом величина тока проводимости не должна отличаться более, чем на 20% от значений, приведенных в паспорте. Допускается проводить измерение тока проводимости с помощью миллиамперметра постоянного тока, при этом значение тока проводимости примерно на 10% ниже, чем измеренное миллиамперметром переменного тока под рабочим напряжением. В случае отклонения напряжения сети от значения наибольшего рабочего напряжения $U_{нр}$ следует проводить пересчет тока проводимости по формуле 49

$$I_{пр} = I_{и} * U_{нр} / U \quad (49)$$

где $I_{пр}$ – ток проводимости при наибольшем рабочем напряжении сети, мА_{дейст};

$I_{и}$ – измеренный ток проводимости, мА_{дейст};

U – напряжение сети в момент измерения тока, кВ_{дейст};

$U_{нр}$ - наибольшее рабочее напряжение ОПН.

В случае отклонения температуры, при которой производится измерение тока проводимости, от величины предыдущего измерения, следует производить пересчет тока проводимости по формуле 50

$$I_{т0} = I_{т} / [1 + k_{т} (T - T_{0})], \text{ мА}_{\text{дейст}} \quad (50)$$

где $I_{т0}$ – ток проводимости при температуре окружающей среды 293 °К ;

T_{0} – нормальная температура окружающей среды 293 °К ;

$I_{т}$ – ток проводимости при температуре окружающей среды T ;

$k_{т} = 0,0018$ В/град – температурный коэффициент высоконелинейных варисторов напряжении длительного эксплуатационного режима.

Диапазоны допустимых значений тока проводимости, протекающего через высоконелинейные варисторы аппарата, обычно находятся в пределах, приведенных в таблице 31.

Таблица 31 - Диапазоны допустимых значений тока проводимости

Тип ОПН	$U_{нр}$, кВ	Ток проводимости мА (действующее значение)
ОПН-110	73	0,4-0,65
ОПН-150	100	0,5-0,8
ОПН-220	146	0,6-0,9

ОПН-330	210	1,1-1,5
ОПН-750	455	3,0-4,0
ОПН 6-35	$U_{нр}$	≤ 1

Если измеренное значение тока проводимости достигает величин, приведенных в таблице 32, то ограничитель должен быть снят с эксплуатации.

Таблица 32 - Измеренное значение тока проводимости

Тип ОПН	Ток проводимости при $U_{нр}$, $mA_{действ.}$
ОПН-110	1,2
ОПН-150	1,5
ОПН-220	1,8
ОПН-330	3,0
ОПН-6-35	

Техническое обслуживание ОПН, находящихся в эксплуатации, включает:

- внешний осмотр;
- чистка изоляции;
- восстановление защитных покрытий;
- проверка болтовых соединений;
- измерение тока проводимости и сопротивления изоляции;
- тепловизионный контроль.

В эксплуатации испытания ОПН производится для ОПН до 330 кВ один раз в 4 года, ОПН – 750 кВ – один раз в 2 года.

Тепловизионный контроль ОПН производится после ввода в эксплуатацию и в процессе эксплуатации в соответствии с главой В.13.2 СТП 09110.20.366-08.

ОПН следует хранить в горизонтальном положении, под навесом в таре, на открытом воздухе – в распакованном виде. Транспортировать ОПН следует в горизонтальном положении. При хранении ОПН должны быть защищены от прямого попадания дождя.

25. Модифицированные ОПН

В связи с тем, что состояние высоковольтного энергетического оборудования характеризуется высокой степенью его изношенности, то уровни электрической прочности изоляции силовых трансформаторов на многих подстанциях снижены на 15-20 % и современное состояние экономики и электротехнической промышленности не позволяет в массовом порядке проводить ремонты и замены высоковольтного оборудования электрических станций и подстанций, возникла необходимость в применении защитных аппаратов со сниженным

уровнем ограничения перенапряжений. Применение таких ОПН является, для современных условий, экономически оправданным. В этих случаях рекомендуется применение ОПН с искровым модулем. Искровой модуль представляет собой коммутирующее устройство на основе искровых промежутков с магнитным гашением дуги, позволяющее снизить уровень ограничения до 20% по сравнению с величиной стандартного аппарата путем шунтирования части нелинейного резистора ОПН при достижении заданного уровня напряжения на аппарате. Принципиальная схема модифицированного ОПН приведена на рисунке 22.

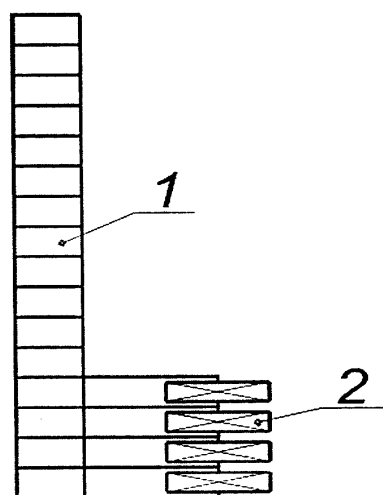


Рисунок 22 - Принципиальная схема модифицированного ОПН

ОПН состоит из колонки последовательно соединенных высоконелинейных сопротивлений варисторов (1). Параллельно части высоконелинейных сопротивлений включаются коммутирующие элементы (2). Количество коммутирующих элементов определяется необходимой величиной дополнительного снижения уровня ограничения перенапряжения.

Под рабочим напряжением и при квазистационарных перенапряжениях модифицированный ОПН ведет себя как стандартный ОПН. При грозовых и коммутационных перенапряжениях в момент достижения максимально возможного расчетного уровня перенапряжения срабатывает коммутирующее устройство, отсекающее часть нелинейных сопротивлений, тем самым обеспечивая снижение уровня ограничения на величину падения напряжения на коммутирующем устройстве. В качестве элементов, составляющих коммутирующее устройство, используются искровые промежутки с магнитным гашением дуги, применявшегося ранее в разрядниках типа РВМГ и РВМ, где дуга горит в поле постоянного магнита, что заставляет ее вращаться. Это усиливает скорость охлаждения дуги и ее погасание.

Так искровые промежутки старого образца коммутировать грозовые импульсы с линейной расчетной амплитудой 100 кА неспособны и изоляционная

основа промежутков, состоящая из электрокартона не стабильна в части геометрии конструкции были применены современные материалы. В качестве изоляционной основы используются современные полимерные материалы, обладающие высокой электрической и механической прочностью. В качестве материалов электродов используется специальный сорт латуни с большим содержанием цинка.

Положительное влияние цинка связано с тем, что наличие паров цинка в среде, где горит электрическая дуга, приводит к более стабильному ее гашению при переходе тока через нуль. Стабильность характеристик зажигания последовательно соединенных искровых промежутков достигается путем шунтирования некоторых из них дополнительными емкостями (керамические конденсаторы). На рисунке 23 приведен общий вид искрового промежутка с магнитным гашением дуги.

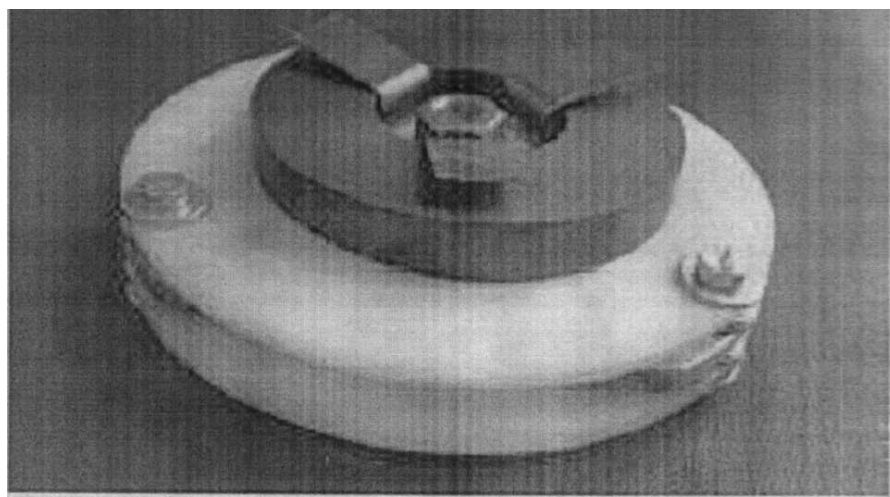


Рисунок 23 - Общий вид искрового промежутка с магнитным гашением дуги.

На рисунке 24 приведена осциллограмма, иллюстрирующая момент зажигания дуги разряда в искровых промежутках и гашения дуги сопровождающего тока.

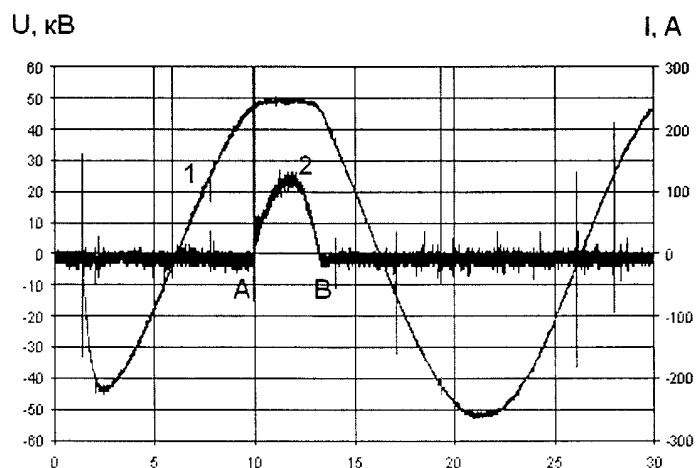


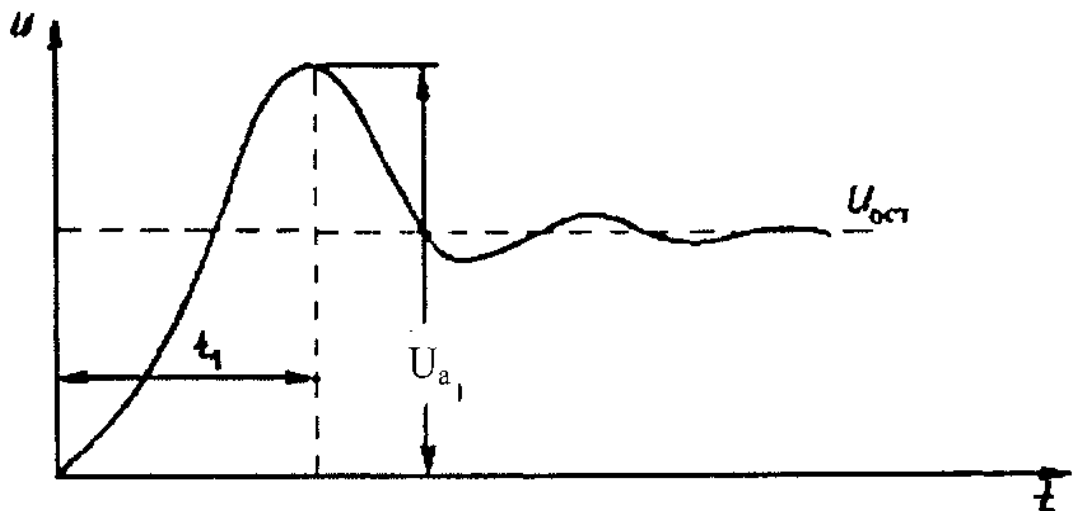
Рисунок 24 – Осциллограммы тока (2) и напряжения (1) при срабатывании искровых промежутков

Для группы искровых промежутков, находящихся под рабочим напряжением (кривая 1), в момент времени, обозначенный символом А, подается грозовой импульс перенапряжения. После зажигания разряда через искровые промежутки протекает сопровождающий ток. В точке В происходит гашение дуги, сопровождающий ток через искровые промежутки прекращается. Разброс напряжения срабатывания группы искровых промежутков, установленных на секции ОПНГ, не превосходит 5 % вне зависимости от типа импульса (грозовой или коммутационный).

26. Координация импульсной прочности изоляции подстанционного оборудования с защитными характеристиками ОПН

На оборудовании, установленном между ВЛ и защитным аппаратом по ходу волны (по ошиновке), форма импульсного перенапряжения в первый момент повторяет форму исходного грозowego импульса (рисунок 25). После прихода волны, отраженной от вступившего в работу защитного аппарата, перенапряжение быстро снижается, приближаясь к значению, равному сумме остающегося напряжения на защитном аппарате и падению напряжения на индуктивности ошиновки. Такое воздействие на изоляцию менее опасно, чем воздействие полного стандартного грозowego импульса той же амплитуды. Перенапряжение в точках подстанции, расположенных по движению волны за защитным аппаратом, имеет вид импульса униполярной формы (рисунок 25); период затухающих колебаний, наложенных на остающееся напряжение защитного аппарата, зависит от параметров схемы подстанции.

а)



б)

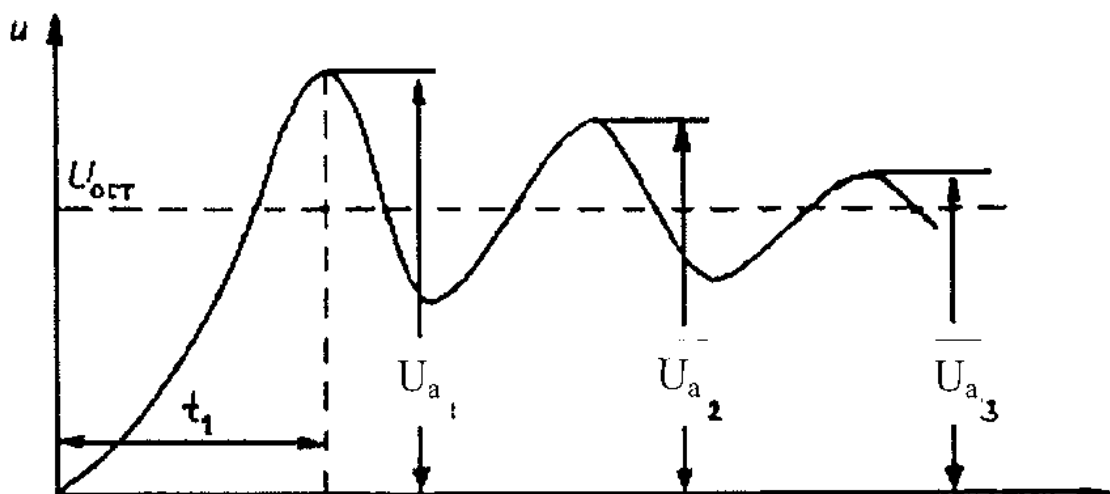


Рисунок 25 – Характерная форма грозовых перенапряжений на подстанционном оборудовании.

а) на входных элементах схемы подстанции (линейный выключатель, разъединитель, конденсатор связи и пр.);

б) на силовом трансформаторе, шунтирующем реакторе;

где U_{a1}, U_{a2}, U_{a3} , - амплитуды последовательных максимумов грозового перенапряжения;

t_1 - время наступления первого максимума U_{a1} ;

$U_{ост}$ - остающееся напряжение ОПН

Шкала допустимых воздействий для различных расчетных условий для силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов приведена в таблице 33.

Таблица 33 – Амплитуда грозовых унipoлярных волн с наложенными колебаниями, допустимая в эксплуатации для изоляции трансформаторов и шунтирующих реакторов

Вид оборудования	Класс напряжения, кВ				
	35	110	220	33	750
Силовые трансформаторы	210	480	750	1050	$\frac{2100}{2250}$
Шунтирующие реакторы					$\frac{2250}{2400}$

Примечание: числитель – полная волна, знаменатель – срезанная волна

Для обеспечения надежной грозозащиты ПС необходима следующая координация прочности изоляции подстанционного оборудования и характеристик ОПН в соответствии с формулой 51:

$$U_{доп} = U_{ост} + \Delta U_{к} \quad (51)$$

где $U_{ост}$ - остающееся напряжение на ОПН при нормированном импульсном токе (токе координации), кВ;

l U_k - координационный интервал, кВ.

Перенапряжения на оборудовании, в непосредственной близости к которому установлен ОПН, практически совпадают с напряжением на ОПНе и определяются его характеристиками, амплитудой и формой протекающего через него тока. Перенапряжения на оборудовании, удаленном на некоторое расстояние от ОПН, превышают напряжение на ОПНе вследствие многократных преломлений и отражений грозových импульсов в узловых точках подстанции. Это превышение зависит, в основном, от крутизны фронта, амплитуды набегающего на подстанцию импульсного напряжения и параметров схемы подстанции: количества установленных защитных аппаратов и расстояний от них до защищаемого оборудования, волнового сопротивления ошиновки и входных емкостей аппаратов ближайших участков подстанции, количества подключенных к ней ВЛ.

Координационный интервал необходим для компенсации: превышения грозowego перенапряжения на защищаемом оборудовании по отношению к напряжению на защитном аппарате из-за его удаленности; увеличения остающегося напряжения при крутом фронте волны тока через ОПН. Значение координационного интервала обычно составляет 20-50%.

Достаточность координационного интервала проверяется путем сравнения тока, протекающего через ОПН $I_{за}$, с нормированным током координации. Ток $I_{за}$ определяется по формуле 52

$$I_{за} = (2 U_a - U_{ост}) / z, \quad (52)$$

где z - волновое сопротивление провода;

U_a - амплитудное значение грозowego импульса, равное 50%- ному разрядному напряжению линейной изоляции.

Для выполнения условия формулы 52 $I_{за}$ должен быть меньше нормированного тока координации.

Графическое построение для определения тока $I_{за}$ и соответствующего ему $U_{ост}$ приведено на рисунке 26. При наличии в РУ нескольких защитных аппаратов должна использоваться обобщающая вольтамперная характеристика защитных аппаратов и волновых сопротивлений отходящих линий. Получение обобщающих характеристик пояснено на рисунке 26.

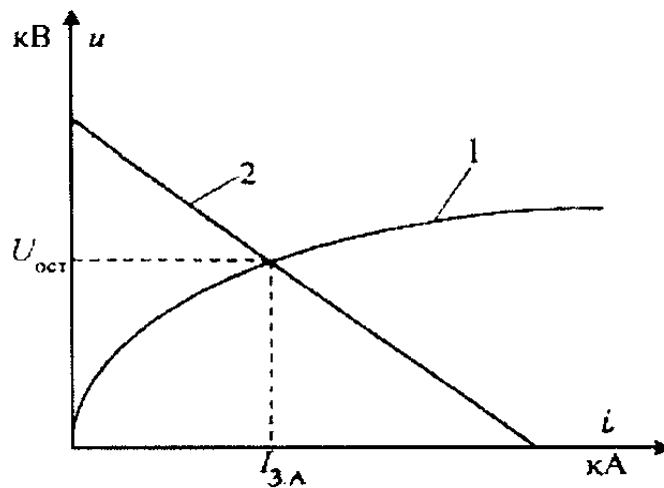


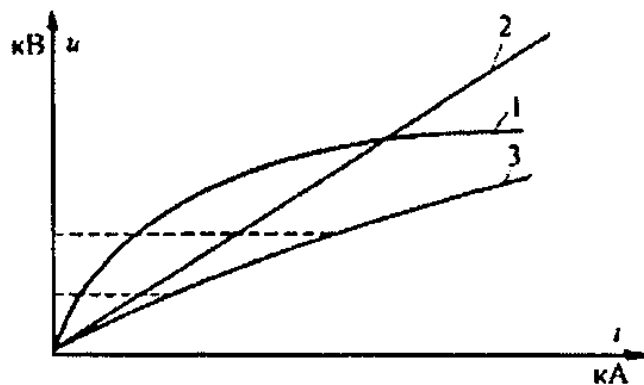
Рисунок 26 - Графическое определение тока через ОПН

1 – вольтамперная характеристика ОПН;

2 – зависимость $U = 2U_a - iZ$.

Построение обобщающей вольтамперной характеристики дано на рисунке 27

а)



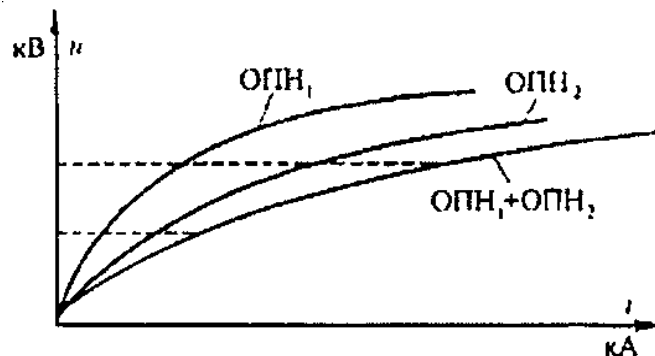
а) сложение вольтамперных характеристик защитного аппарата и волнового сопротивления отходящей линии;

1 - вольтамперная характеристика защитного аппарата (ОПН);

2 - вольтамперная характеристика волнового сопротивления отходящей линии;

3 - обобщающая вольтамперная характеристика.

б)



б) сложение вольтамперных характеристик нескольких ОПН, установленных в РУ.

Рисунок 27 - Обобщающая вольтамперная характеристика.

При выборе ОПН необходимо учитывать ожидаемый срок службы ОПН. Надежность защищаемого ОПН является достаточной, если ожидаемый с доверительной вероятностью $P_{\text{дов}}$ срок службы $N_{\text{сл}}$ ОПН, т.е. ожидаемое число лет его безаварийной работы будет не менее нормируемого техническими условиями, приведенными в таблице 34

Таблица 34 – Нормируемый техническими условиями на ОПН срок службы.

U, кВ	110	220	330	750
$P_{\text{дов}}$	0,98			
$N_{\text{сл}}$	20	20	25	30

Срок службы ОПН, определенный с доверительной вероятностью $P_{\text{дов}}$ определяется по формуле 53

$$N_{\text{сл}}(P_{\text{дов}}) = T_{\text{расп}}/T_{\text{расх}}(P_{\text{дов}}) = T_{\text{расп}}/\sum N_s T_{\text{ос}}(P_{\text{дов}}), \quad (53)$$

где $T_{\text{ос}}(P_{\text{дов}})$ дается величиной, приведенной в таблице 34;

$T_{\text{расп}}$ – задается техническими условиями на ОПН и приведены в таблице 35.

Таблица 35 - Исходный располагаемый ресурс пропускной способности ОПН

U, кВ	110	220	330	750
$T_{\text{расп}}$, отн. ед	97	26	17	16

N_s – ожидаемое число воздействий на ОПН одной фазы приведены в таблице 36.

Таблица 36 - Ожидаемое число воздействий на ОПН одной фазы за год.

№	Вид коммутации	для электропередач, кВ			
		110	220	330	750
1	Плановое включение ненагруженной линии	5-8	5-8	3-6	1-3
2	Включение ненагруженной блочной электропередачи	5-8	5-8	-	-
3	Успешное ОАПВ	-	-	$2,3 \cdot 10^{-3} \cdot l$	$1,2 \cdot 10^{-3} \cdot l$
4	Отключение масляными выключателями ненагруженной линии с короткозамкнутой фазой	3-5	3-5	-	
5	Разрыв передачи после неуспешного ОАПВ	-		$9,1 \cdot 10^{-3} \cdot l$	$6,1 \cdot 10^{-3} \cdot l$
6	3-х фазный разрыв передачи вследствие ликвидации несимметричного к.з.	$3,3 \cdot 10^{-2} \cdot l$	$1 \cdot 10^{-2} \cdot l$	$2,7 \cdot 10^{-2} \cdot l$	$1 \cdot 10^{-3} \cdot l$
7	Успешное ТАПВ	$2,3 \cdot 10^{-2} \cdot l$	$6,1 \cdot 10^{-2} \cdot l$	$5 \cdot 10^{-4} \cdot l$	$2,4 \cdot 10^{-4} \cdot l$
8	Неуспешное ТАПВ	$4,4 \cdot 10^{-2} \cdot l$	$2,15 \cdot 10^{-2} \cdot l$	$7 \cdot 10^{-3} \cdot l$	$1,2 \cdot 10^{-4} \cdot l$
9	Разрыв передачи при асинхронном ходе	-	-	$3,5 \cdot 10^{-5} \cdot l$	$4,8 \cdot 10^{-5} \cdot l$

В настоящее время в сетях осуществляется массовая установка ОПН, не имеющего искрового промежутка вследствие высокой нелинейности вольтам-

перной характеристики нелинейных сопротивлений (варисторов). ОПН рассчитаны на длительное воздействие напряжения $U_{нро}$ промышленной частоты. В случае, если напряжение промышленной частоты не повышается сверх $U_{нро}$, заметная энергия может выделяться в варисторах ОПН лишь при импульсных перенапряжениях, сопровождаемых импульсными токами

$$W_{опн} = W_{имп} \quad (54)$$

При правильном выборе $U_{нро}$ ресурс ОПН определяется импульсными токами и, в отличие от разрядников, не зависит от тока проводимости под рабочим напряжением сети. Степень опасности для ОПН импульсных токов определяется выделяющейся при них энергией

$$W_{имп} = \int_0^t U(\tau) i(\tau) d\tau, \quad (55)$$

которая зависит и от величины, и от длительности (формы) импульсного тока. Вместе с тем, регистраторы числа срабатываний реагируют на факт протекания тока, величина которого больше определенного значения, и никак не учитывают формы импульсного тока, а значит, не дают представления об энергии, которая выделяется в ОПН.

Для иллюстрации этого на расчетной осциллограмме рисунок 28 при грозовых перенапряжениях приведены два импульса тока в типовом ОПН 110 кВ (остающееся напряжение при грозовом импульсном токе 10 кА формы 8/20 мкс составляет 250 кВ). Несмотря на равенство максимальных значений токов (около 4 кА), выделяющаяся энергия для первого импульса (около 10 кДж) в четыре раза меньше, чем для второго (около 40 кДж), что показано на рисунке 29

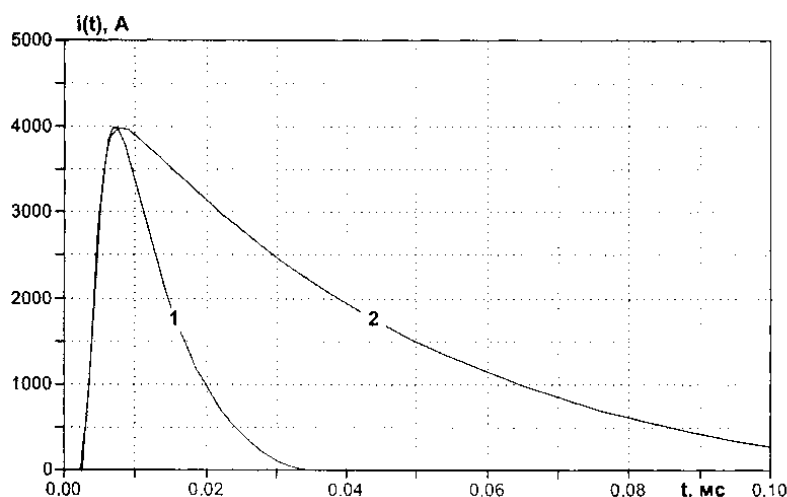


Рисунок 28 – Расчетная осциллограмма двух грозовых импульсных токов различной формы.

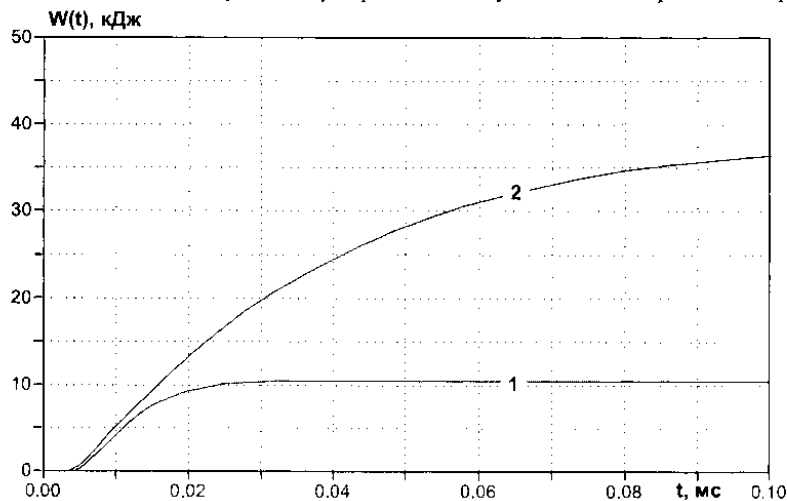


Рисунок 29 - Энергия, выделяющаяся в типовом ОПН 110 кВ при протекании токов.

Счетчики числа срабатываний (при должном принципе работы и качестве изготовления) могут давать представление лишь о том, сколько раз ОПН пропускал в себя импульсные токи. Такая информация теоретически может быть полезна для того, чтобы оценить эффективность работы ОПН в той или иной точке сети: если ОПН не работает, то зачем его ставить? Однако на практике, даже в случае нулевых показаний счетчика, отказ от установки ОПН вряд ли возможен. Во-первых, потому, что нет уверенности в корректной работе счетчика, а во-вторых – вследствие статистической природы грозových и коммутационных перенапряжений. Опасные грозových перенапряжения, способные повредить изоляцию оборудования распределительного устройства, могут в типовых схемах возникать один раз в сотни лет эксплуатации, т.е., вполне возможно, ни разу за срок службы 25-30 лет конкретного ОПН. Полезную информацию о срабатываниях ОПН могли бы дать более сложные по сравнению со счетчиками устройства – такие, которые давали бы представление о выделяющейся в ОПН энергии, т.е. были бы построены на принципе интегрирования кривой тока. Подобные устройства, очевидно, будут гораздо дороже примитивных счетчиков, и об их массовом применении совместно с ОПН 110-750 кВ говорить не приходится.

Предположим, при помощи сложных устройств регистрации будет достоверно известна суммарная величина энергии $W_{\text{опн}}^{\text{сум}}$ перенапряжений, которая выделилась в ОПН в процессе эксплуатации. Эту энергию можно было бы использовать для принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации ОПН только в том случае, если бы был известен ресурс конкретного ОПН по энергии $W_{\text{опн}}^{\text{макс}}$.

Методика выбора ОПН, основанная на понятии ресурса, достаточно

сложно реализуема, поскольку:

- свойства нелинейных сопротивлений (варисторов) ОПН таковы, что эти варисторы обладают значительным ресурсом, «точное» значение которого в испытаниях не выявить;

- по своим последствиям для варисторов ОПН нельзя приравнять один импульс тока с энергией $W_{\text{имп}}$ и десять импульсов тока с энергией $0,1W_{\text{имп}}$;

- изменения свойств варисторов, вызванные протеканием в них импульсных токов, компенсируются последующим воздействием на варисторы рабочего напряжения сети.

Оценка состояния ОПН в эксплуатации, как и методика выбора ОПН, не могут быть построены на основе информации о суммарной выделенной энергии $W_{\text{опн}}^{\text{сум}}$. Поэтому регистраторы срабатываний ОПН, которые могли бы дать информацию $W_{\text{опн}}^{\text{сум}}$, не позволяют сделать конкретные выводы. Поэтому применение регистраторов срабатывания ОПН не несет информативности о состоянии ОПН.

Измерение тока протекания через ОПН, находящегося под рабочим напряжением также неэффективно, так как в нормальных условиях ОПН представляет собой емкость и ток, протекающий через него, несет емкостной характер. Активная составляющая тока проводимости, обусловленная увлажнением варисторов, деградацией материала варистора и протеканием тока утечек из-за загрязнения поверхности ОПН, на порядок меньше емкостного тока. Поэтому измерение общего тока через ОПН не несет информативности о состоянии ОПН.

Более эффективным устройством для определения состояния ОПН является устройство типа УКТ-03. Устройство предназначено для измерения параметров тока проводимости, протекающего через ОПН при рабочем напряжении действующих значений гармонических составляющих тока 50 Гц и 150 Гц и максимального значения тока. Данные измерения необходимы для выявления преждевременного старения нелинейных металлооксидных сопротивлений, из которых комплектуется ОПН.

В состав устройства входят:

- датчик тока, стационарно встроенный в заземляющий проводник ОПН;
- пульт измерения, подключенный к датчику на время измерений.

Технические данные устройства

В селективных режимах работы «50 Гц» или «150 Гц» устройство измеряет действующие значения первой (50 Гц) или третьей (150 Гц) гармонических составляющих тока проводимости ОПН.

В качестве дополнительного, справочного параметра в режиме работы «Мах» измеряется максимальное значение тока проводимости в полосе частот: 50÷ 500 Гц.

Диапазон измеряемых токов:

- в режиме «50 Гц» $J_{50} - 0,1 \div 5$ мА;
- в режиме «150 Гц» $J_{i50} - 0,1 \div 5$ мА;
- в режиме «Мах» $I_{\text{Мах}} - 0,3 \div 7,5$ мА;

Предел допускаемой основной погрешности измерения тока:

- в режиме «50 Гц» - не более 6%;
- в режиме «150 Гц» - не более 6%;
- в режиме «Мах» - не более 10%;

Номинальная полоса частот в селективных режимах работы:

- в режиме «50 Гц» - 49÷ 51 Гц;
- в режиме «150 Гц» - 147÷ 153 Гц

Время измерения в селективных режимах работы: 1,5с;

Время измерения в режиме «Мах»: 5с;

Коэффициент передачи гармоники тока 50 Гц на выход устройства УКТ-03 в режиме измерения «150 Гц» - не более: $K_{\text{п}} \leq 0,01$.

Пульт имеет автономное питание 6 В (4 батареи типа «А316»).

Ток потребления - не более 20 мА.

Условия эксплуатации.

1. Рабочие условия эксплуатации:

Для пульта:

- температура окружающей среды от 0 до +40°C;
- относительная влажность воздуха до 90%

Для датчика:

- температура окружающей среды от -45 до 45 °С;
- относительная влажность воздуха до 98%.

2. Нормальные условия применения для пульта и датчика следующие:

- температура окружающей среды 20±10 °С;
- относительная влажность воздуха 65±30%.

3. Датчик тока выдерживает протекание разрядного тока ОПН (импульс 8/20 мкс) с амплитудой 20кА.

4. Устройство рассчитано на эксплуатацию при воздействии внешних электрических и магнитных полей 50 Гц с уровнем:

- напряженности электрического поля до 20 кВ/м;
- напряженности магнитного поля до 20 А/м.

Дополнительная погрешность измерения связанная с воздействием магнитного поля на датчик устройства в режимах «50 Гц», «150 Гц» и «Мах» - не более 5%.

Дополнительная погрешность измерения связанная с воздействием электрического поля в режимах «50 Гц», «150 Гц» и «Мах» - не более 2%.

Масса пульта - не более 1 кг; масса датчика - не более 1,6 кг.

Габаритные размеры пульта: 204x125x54, датчика: \varnothing 70x105.

Конструкция и принцип действия

Конструкция датчика тока.

Конструкция датчика тока показана на рисунке 30. Датчик тока имеет две обмотки (измерительную и калибровочную), расположенные на кольцевом ферромагнитном сердечнике (1), по оси которого проходит токоведущий проводник (3). Датчик выполнен в стальном герметичном корпусе (2). Диэлектрическая втулка (4) изолирует токоведущий стержень от нижней крышки корпуса датчика. Подключение датчика к пульту во время измерений осуществляется через разъем (5), оснащенный закручивающейся крышкой. Присоединение датчика к заземляющему проводнику (6) производится с помощью шайб и гаек (7).

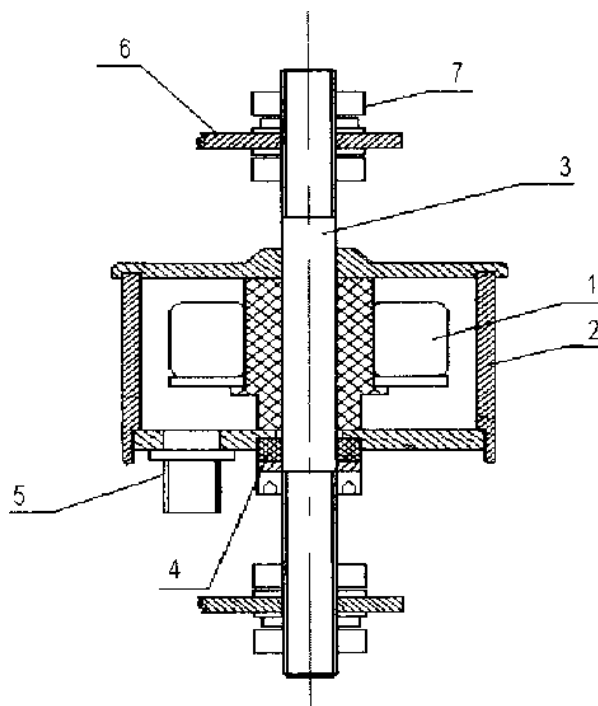


Рисунок 30 - Конструкция датчика тока

Конструкция пульта измерения.

Пульт измерения конструктивно выполнен в виде самостоятельного прибора бесфутлярной конструкции в металлическом корпусе (рисунок 31). На передней панели пульта размещаются кнопки выбора режимов измерения, включения питания пульта и табло ЖКИ индикатора. Кнопочные органы управле-

ния имеют следующие обозначения:

- «50Гц» - режим измерения первой гармоники тока 50 Гц;
- «150Гц» - режим измерения третьей гармоники тока 150 Гц;
- «Мах» - режим измерения максимального значения тока;
- «Вкл.» - включение питания пульта.

На передней панели пульта расположен также разъем для подключения соединительного кабеля.

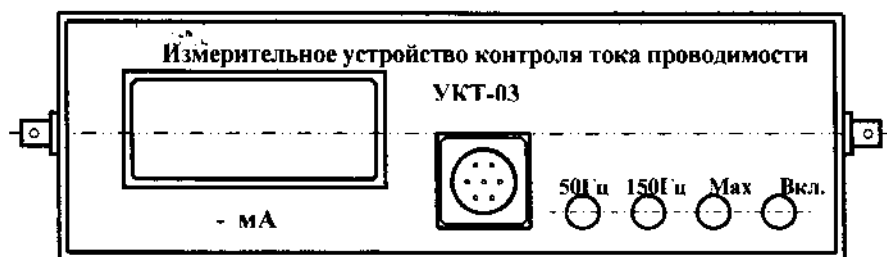


Рисунок 31 - Внешний вид передней панели пульта.

Электрическая схема пульта выполнена на двух печатных платах. Основная плата с расположенными на ней кнопками включения режимов измерения установлена в нижней части пульта, плата индикации закреплена на лицевой панели пульта. Отсек под батареи питания закреплён на задней панели. На боковых стенках корпуса расположены удерживающие втулки крепления ремня для переноски пульта при проведении измерений.

Принцип действия.

Измерение тока основывается на принципе пояса Роговского. Датчик тока включается в цепь заземления ОПН (в рассечку заземляющего проводника). Ток проводимости, стекающий по заземляющему проводнику ОПН, наводит ЭДС в измерительной обмотке, величина которой пропорциональна произведению частоты и амплитуды соответствующих гармонических составляющих тока и определяется их суммой. Сигнал с измерительной обмотки поступает на пульт, где производится его частотная селекция, усиление и преобразование сигнала в цифровую форму для индикации. Выделение уровня основной и третьей гармоники сигнала тока осуществляется методами цифровой обработки сигнала.

Для компенсации и устранения погрешностей измерений, связанных с влиянием температуры окружающей среды и нестабильным коэффициентом передачи датчика тока, в схеме пульта предусмотрена функция автоматической калибровки. При автоматической калибровке происходит селективное измерение калибровочного тока введенного в калибровочную обмотку датчика на частоте 90Гц. По результатам измерения автоматически проводится коррекция ко-

эфициента усиления измерительного тракта.

Принудительное включение УКТ-03 в режим автоматической калибровки возможно одновременным нажатием трех кнопок режимов измерения «50Гц», «150Гц» или «Мах». При таком включении на табло индикатора выводится калибровочное число (3000 ± 1000), соответствующее подключенному датчику тока. Режим автоматической калибровки может быть использован для диагностики неисправностей УКТ-03 или проверки исправности датчиков.

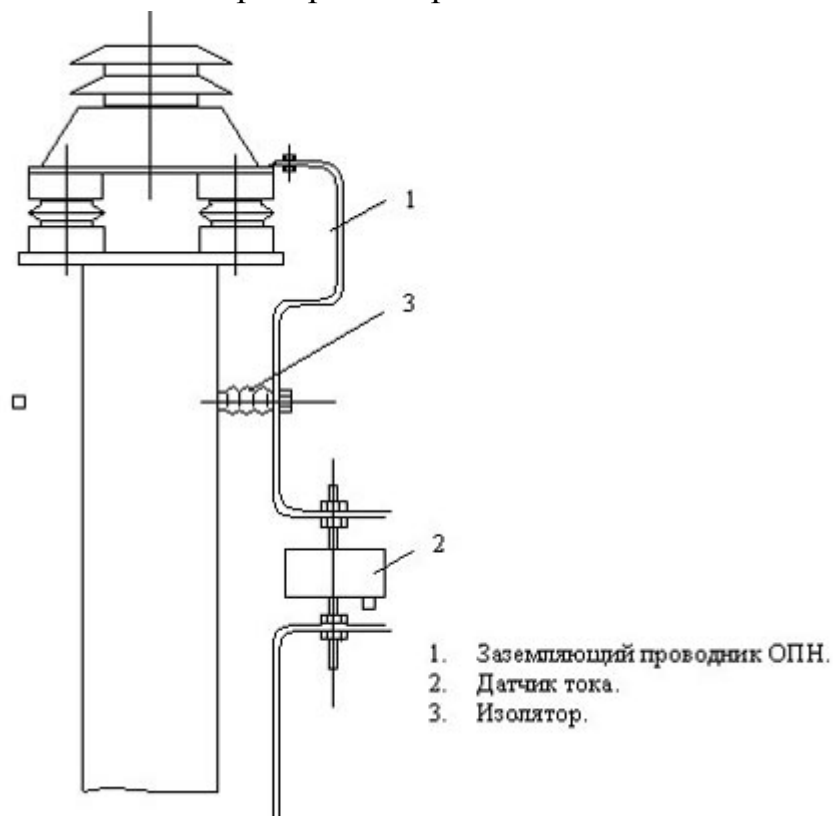


Рисунок 32 - Схема включения датчика тока

Порядок производства измерений:

– установите элементы питания, если они не были установлены ранее. Для этого выключите прибор и снимите крышку отсека питания, предварительно отвернув два винта на задней панели пульта, и установите элементы с соблюдением полярности.

Внимание! Неверная установка может привести к выходу из строя блока питания пульта.

– проведите опробование пульта при отключенном датчике тока, выполнив следующие операции:

- нажатием кнопки «ВКЛ» включите питание пульта (все кнопки выбора режимов измерения - отжаты); на табло ЖКИ индикатора должно индицироваться напряжение питания батареи со знаком "+";

- на напряжение питающей батареи должно находиться в пределах 5,4-6,5В; при напряжении батареи ниже 5,4В на табло индикатора появляется зна-

чок LB, что указывает на непригодность пульта к работе; в этом случае произведите замену элементов питания:

- включите один из режимов измерения «50Гц», «150Гц» или «Мах», на табло индикатора должны появиться 4 мигающие точки.

- отключите пульт повторным нажатием кнопки «ВКЛ».

Примечание 1: Напряжение питающей батареи выводится на табло индикатора при всех отжатых кнопка выбора режимов измерения работы УКТ-03, а также при одновременном включении двух из них.

Примечание 2: При отключенном датчике тока включение одного из режимов «50Гц», «150Гц» или «Мах» воспринимается схемой измерения УКТ-03 как неисправность в цепи измерения, в результате на табло индикатора выводятся 4 мигающие точки (признак неисправности).

- проведите опробование с датчиком тока. Указанную операцию рекомендуется проводить для контроля пригодности датчиков перед их установкой.

- распакуйте датчик и подключите его к пульту;
- нажатием кнопки «ВКЛ» включите питание пульта;
- при одновременном нажатии всех трех кнопок режимов измерения на табло индикатора будет выведено калибровочное число соответствующее подключенному датчику в пределах 3000 ± 1000 ;

- если показания индикатора не соответствуют выше указанным пределам или показания отсутствуют, то датчик бракуется.

ВНИМАНИЕ! После воздействия отрицательных температур пульт необходимо выдержать в нормальных условиях не менее 2 часов.

- Отверните крышку разъема на корпусе датчика.

- Подключите соединительный кабель к пульту.

- Подключите заземляющий проводник соединительного кабеля (4) пульта к заземляющему проводнику ОПН (5) с нижней стороны датчика, как показано на рис.4.

- Посредством соединительного кабеля подключите пульт к датчику.

- Включите пульт нажатием кнопки «ВКЛ».

- Проведение измерений.

- Выберите режим измерения нажатием кнопки «50Гц», «150Гц» или «Мах».

ВНИМАНИЕ! При включении одной из кнопок выбора режима измерения остальные кнопки должны быть отжаты.

- Зафиксируйте показания на индикаторе при каждом режиме измерения и внесите их в рабочий журнал (рекомендуется представлять резуль-

таты измерений в табличном виде).

– По окончании измерений, отсоедините соединительный кабель и затем его заземляющий проводник от датчика, отключите питание пульта (отжав кнопку «ВКЛ»). Установите на место крышку разъема на датчике тока.

Примечание. Если датчик не исправен, то вместо измеренных значений на табло индикатора выводятся 4 мигающие точки. Если мигающие точки появляются одновременно с результатами измерения, то погрешность измерения устройства будет выше заявленной. В данном случае рекомендуется заменить датчик.

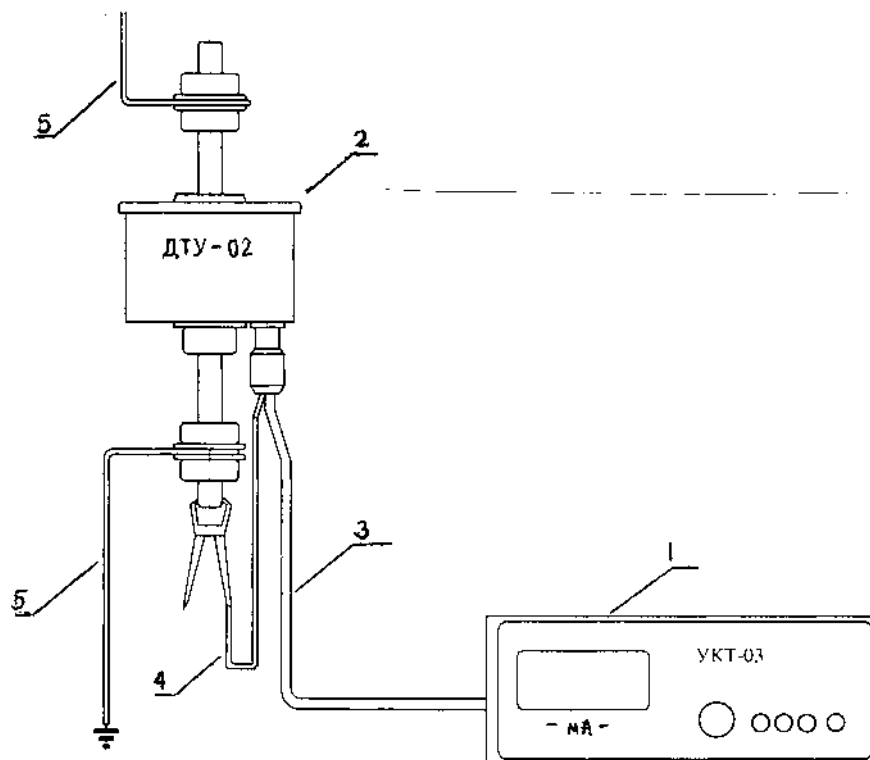


Рисунок 33 – Схема включения датчика в цепь заземления ОПН

1- пульт устройства, 2 – датчик тока, 3 – соединительный кабель, 4 - заземляющий проводник кабеля, 5 - заземляющий проводник ОПН.

Недостатком этого устройства, разработанного в Новосибирске в 2006 году, является ненаработка нормирующих данных дефектации ОПН из-за небольшого объема примененных устройств. Кроме того, изготовитель требует проведения периодической калибровки пульта управления (не реже 1 раза в год) в соответствии с методикой завода-изготовителя. Так как, БелГим таких калибровок не производит, то калибровка по требованию изготовителя производится на предприятии совместно с Новосибирским ЦСМ. Эти недостатки сдерживают применение УКТ-03, но с каждым годом увеличивается срок эксплуатации ОПН, что обуславливает необходимость применения таких устройств для определения степени деградации металлооксидных сопротивлений.

Список используемой литературы

1. ИЗИ-70-021-85 Инструкция по эксплуатации средств защиты от перенапряжений. Союзтехэнерго. Москва. 1986г.
2. ГОСТ Р 52725-2007 Ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Москва. Стандартиформ. 2007г.
3. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений. Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. 2002г.
4. Федеральная Сетевая Компания Единой Энергетической системы (ОАО «ФСК ЕЭС»). Методические указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,4-10 кВ от грозовых перенапряжений. Москва. 2004г.
5. Временные методические указания по выбору ограничителей перенапряжений ОПН в сетях 0,38-10 кВ. Минск. 2002г.
6. ТКП 339-2011. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемодаточных испытаний. Минскэнерго. Минск. 2011г.
7. ТКП 336-2011. Молниезащита зданий, сооружений и инженерных коммуникаций. Минскэнерго. Минск. 2011г.
8. Дмитриев М.В. Применение ОПН в электрических сетях 6-750 кВ. Санкт-Петербург. 2007г.
9. СТП 09110.47.203-07 Методические указания по выполнению заземления на электрических станциях и подстанциях напряжением 35-750 кВ.
10. Труды Четвертой Всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений, режимы заземления нейтрали» Новосибирск. 2006г.
11. Паперный Л.Е., Куличенко В.П. Защита от атмосферных и внутренних перенапряжений в электроустановках напряжением 6-750 кВ. Минск. 2010г.

Приложение 1

Выдерживаемый уровень напряжения изоляцией электрооборудования 3-35 кВ

Вид оборудования	Вид изоляции электрооборудования	Класс напряжения, кВ	Наибольшее рабочее напряжение, кВ	Одноминутное испытательное напряжение ($U_{\text{ИМин}}$) кВ	Выдерживаемый уровень коммутационных перенапряжений ($U_{\text{ВЫД}}$), кВ	Испытательное напряжение полного грозового импульса ($U_{\text{ПГИ}}$) кВ	Выдерживаемый уровень грозовых перенапряжений, кВ
1	2	3	4	5	6	7	8
Внутренняя изоляция трансформаторов	Нормальная	3	3,5	18	30,8	44	45,1
		6	6,9	25	42,7	60	59,4
		10	11,5	35	59,8	80	77,0
		15	17,5	45	63,45	108	102,3
		20	24,0	55	93,8	130	121,0
	Облегченная	3	3,6	10	17,1	-	-
		6	6,9	16	27,4	-	-
		10	11,5	24	41,0	-	-
		15	17,5	37	63,3	-	-
		20	24,0	50	85,5	-	-
Внутренняя изоляция аппаратов	Нормальная	3	3,6	24	37,2	42	42,9
		6	7,2	32	49,6	57	56,1
		10	12,0	42	65,1	75	71,5
		15	17,5	55	85,2	100	93,5
		20	24,0	65	100,7	120	110,0
	Облегченная	3	3,6	10	17,1	-	-
		3*	3,6	10*	17,1	20*	18,7
		6	6,9	16	27,4	-	-
		6*	6,9	20*	34,2	40*	37,4
		10	11,5	24	41,0	-	-
		10*	11,5	28*	47,9	60*	55
		15	17,5	37	63,3	-	-
		15*	17,5	38*	65,1	75*	66
20	24,0	50	85,5	-	-		
20*	24,0	50*	85,5	95*	82,5		

* значения по [ГОСТ 1516.3](#) относятся к изоляции трансформаторов и аппаратов.

Приложение 2

Выдерживаемый уровень перенапряжений изоляцией электрических машин

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

Испытательные напряжения муфт силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией (ГОСТ 13781.0-86Е)

U _{ном.} кВ	Соединительные муфты всех типов			Концевые муфты наружной установки			
	Напряжение постоянного тока*1, кВ		Действующее значение переменного тока, кВ			Максимальное значение Импульсного напряжения, кВ	
	Муфты на кабельных линиях	Муфты на отрезках кабеля	Муфты на отрезках кабеля*2	в сухом состоянии	под дождем	полная волна	срезанная волна
1	6	6	7	8	6	15	18
3	16	18	25	27	20	44	52
6	36	45	32	36	26	60	73
10	60	60	42	46	34	80	100
20	100	100	68	75	55	125	158
35	175	175	100	110	85	195	240

*1 - Продолжительность испытания постоянным током 10 мин.

*2 - Продолжительность испытания соединительных муфт переменным током 40 мин.

Примечания: 1. Соединительные и концевые муфты для кабелей с пластмассовой изоляцией должны выдерживать после монтажа на кабельной линии испытательное напряжение постоянного тока $6 U_{ном}$ в течение 10 мин.

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

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

U _{ном} , кВ	0,66	1	3	6
U _{исп} , кВ	2,5	4	8	15

Испытательное напряжение выпрямленного тока, кВ, для кабелей с бумажной изоляцией

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

Испытательное напряжение частотой 0,1 Гц кабелей с изоляцией из сшитого пропилена

Напряжение кабеля, кВ	Испытательное напряжение, кВ
6	12
10	18
20	35
35	60

В случае отсутствия установки для испытания кабельных линий перемен-

ным напряжением частотой 0,1 Гц допускается испытание выпрямленным напряжением при приемо-сдаточных испытаниях:

Напряжение кабеля, кВ	Испытательное напряжение, кВ
6	30
10	50

в эксплуатации:

Напряжение кабеля, кВ	Испытательное напряжение, кВ
6	25
10	42

Уровень выдерживаемых напряжений электрооборудованием 3-35 кВ при коммутационных перенапряжениях определяется уровнем испытательных напряжений, которые нормируются ГОСТ 1516.3. В приложениях 1,2,3 приведены испытательные напряжения электрооборудования 3-35 кВ и выдерживаемый уровень коммутационных и грозовых перенапряжений. Переход от испытательного напряжения к выдерживаемому изоляцией электрооборудования уровню коммутационных перенапряжений определяется исходя из одноминутных испытательных напряжений ($U_{1 \text{ мин}}$), которые нормируются ГОСТ 1516.3.

$$U_{\text{выд}} = k_{\text{и}} * k_{\text{к}} * \sqrt{2} * U_{1 \text{ мин}},$$

где $U_{1 \text{ ми}}$ – одноминутное испытательное напряжение, кВ;

$k_{\text{и}}$ – коэффициент импульса, учитывающий упрочнение изоляции при более коротком импульсе по сравнению с испытательным;

$k_{\text{к}}$ – коэффициент кумулятивности, учитывающий многократное воздействие перенапряжений и возможное старение изоляции.

Для аппаратов $k_{\text{и}} = 1,1$ и $k_{\text{к}} = 1,0$.

Выдерживаемый уровень грозовых перенапряжений для электрооборудования определяется по формуле:

$$U_{\text{выд},2} = 1,1(U_{\text{иги}} - U_{\text{н}}),$$

где $U_{\text{иги}}$ – испытательное напряжение полного грозового импульса, кВ;

$U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение.

Перенапряжения в сетях 6-35 кВ.

Сети 6-35 кВ традиционно работают с изолированной нейтралью либо с компенсацией емкостного тока замыкания на землю. Дугогасящие аппараты для компенсации емкостного тока замыкания на землю устанавливаются, если его величина превышает определенные нормированные значения: 30 А для сети 6 кВ, 20 А для сети 10 кВ и 10 А для сети 35 кВ. Сети с изолированной или компенсированной нейтралью длительно работают однофазным замыканием на землю (033).

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

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

Перенапряжения при коммутациях.

Включение воздушных (ВЛ) и кабельных (КЛ) линий.

При включении КЛ и ВЛ в нормальном симметричном режиме перенапряжения не превышают $2,0U_{\phi}$. При наличии в сети 033 в процессе, поиска «земли» перенапряжения увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз. Поскольку увеличивается до линейного напряжение на здоровых фазах.

Отключение ВЛ и КЛ.

Перенапряжения при отключении ненагруженных кабельных и воздушных линий возникают при отключении с повторными зажиганиями дуги. В случаях коммутаций при наличии 033 сети, а также линии, емкость которой оказывается больше, чем емкость на землю, питающих шин и соединений к ним перенапряжения возрастают. Максимальные перенапряжения при отключении ненагруженных КЛ и ВЛ перенапряжения могут составлять 4,0- 4,3 U_{ϕ} .

Отключение ненагруженных трансформаторов

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

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

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

Отключение двойного замыкания на землю.

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

Отключение двухфазных коротких замыканий.

В целом ряде схем 6-35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью при отключении двухфазных КЗ возникают перенапряжения, связанные с тем, что в момент отключения тока КЗ при его нулевом значении одновременно обрывается вблизи своего максимума и ток намагничивания ненагруженного трансформатора либо ток дугогасящего реактора. Высвобождающаяся магнитная энергия заряжает емкости схемы и создает перенапряжения.

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

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

$$U_{\text{пер}} = U_{\phi} \omega_0 / 2I\omega,$$

где ω - рабочая частота; $\omega_0 = 1 / \sqrt{L_p 3C_{\text{ш}}}$ - собственная частота коле-

баний на шинах. На подстанциях, где ω может оказаться много больше ω_0 , для защиты от перенапряжений потребуется установка вентильных разрядников или ОПН на дугогасительном реакторе.

Перенапряжения при включениях электродвигателей.

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

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

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

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

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

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

Включение электродвигателя в процессе АВР или АПВ

Включение двигателя в процессе АВР или АПВ при несинхронном

остаточном напряжении двигателя повышает возможные перенапряжения по сравнению с простым включением. Образование перенапряжений аналогично таковым при простом включении, отличие в начальных условиях. По данным максимальные перенапряжения в процессе АВР или АПВ могут составлять $4,2U_{\phi}$. Однако величина этих перенапряжений существенно зависит от величины остаточного напряжения двигателя в момент коммутации. После отключения двигателя от сети напряжение на нем уменьшается постепенно, поскольку магнитный поток двигателя поддерживается за счет токов, индуцируемых в контурах ротора в момент отключения. Поскольку двигатель продолжает вращаться за счет запасенной механической энергии, в его обмотках генерируется напряжение. Это напряжение уменьшается вследствие затухания индуцируемых токов и снижения скорости вращения электродвигателя. Процесс снижения напряжения зависит от параметров электродвигателей. Время, за которое напряжение двигателя собственных нужд электростанции уменьшается до 0,4 начального значения колеблется от 0,46 до 2 с.

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

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

Отключение электродвигателей.

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

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

потока в роторе и снижения его оборотов.

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

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

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

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

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

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

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

Перенапряжения, инициируемые вакуумными выключателями

При коммутациях вакуумными выключателями малых индуктивных токов (ненагруженных трансформаторов и заторможенных электродвигателей) возможны перенапряжения высоких кратностей. Перенапряжения, инициируе-

мые вакуумными выключателями, можно подразделить на три вида:

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

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

– перенапряжения при виртуальном срезе тока. Этот вид перенапряжений наиболее опасен для изоляции. Он связан с многочисленными пробоями и гашениями дуги на первой отключившейся фазе и, как следствие, возникновение эскалации перенапряжений на одной или двух фазах, отключаемых позднее. Кратности этих перенапряжений велики и могут приводить к тяжелым повреждениям электрооборудования.

Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю.

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

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

Заземляющая дуга может иметь прерывистый («перемежающийся») характер. Такая дуга является своего рода коммутатором замыкания и

размыкания которого приводят к перенапряжениям.

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

Перенапряжения в сети с изолированной нейтралью.

Величина перенапряжений при дуговых замыканиях на землю определяется моментами гашения и зажиганиями дуги. Перемежающиеся дуги в одних случаях могут иметь малое напряжение повторных зажиганияй (заметно меньше U_{ϕ}), в других - характеризуются быстрым возрастанием напряжений последующих зажиганияй.

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

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

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

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

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

Перенапряжения в сети с компенсацией емкостного тока на землю.

При компенсации емкостного тока на землю изменяется характер восста-

новления напряжения на больной фазе после погасания дуги, поскольку дугогасящий реактор в нейтрали сети (ДГР) меняет величину и характер напряжения в нейтрали. В схеме с ДГР напряжение на нейтрали носит колебательный характер.

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

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

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

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

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

Дуговые перенапряжения при резисторном заземлении нейтрали.

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

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

Влияние активной нагрузки на перенапряжения при дуговых замыканиях на землю.

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

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

Резонансные повышения напряжения.

Резонансные повышения напряжения в сетях 6-10 кВ.

В сетях 6-10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, возможны резонансные повышения напряжения. Причиной их являются многократные, разряды емкости сети в процессе дугового замыкания, через обмотку ВН трансформатора напряжения, насыщение магнитопровода одной из фаз всех трансформаторов напряжения сети, что приводит к увеличению тока через обмотку ВН, разогреву обмотки ВН и повреждению трансформаторов напряжения. Такие повреждения наблюдаются с трансформаторами напряжения НТМН и НОМ, ЗНОМ-35, НКФ-110-220, ЗНОЛП-110 при однофазных дуговых замыканиях на землю в схемах с малыми токами замыкания на землю (до 1 А).

При заземлении нейтрали через ДГР или резистор феррорезонанс не возникает.

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

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

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

Если в сети 6-10 кВ с трансформаторами напряжения НТМИ-6 или НТМИ-10 невозможно ограничиться одним трансформатором напряжения по условию работы релейной защиты или учета электроэнергии, то рекомендуется замена второго НТМИ на два однофазных трансформатора напряжения НОМ-6 или НОМ-10, включаемых на два между фазных напряжения.

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

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

Резонансные повышения напряжения в сетях 35 кВ.

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

Рекомендации по предотвращению феррорезонанса в сетях 35 кВ.

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

Если вывод из работы части ЗНОМ-35 невозможен, например, из-за необходимости питания цепей РЗА либо счетчиков электроэнергии. Рекомендуется замена ЗНОМ-35 на НОМ-35, включаемых на линейное напряжение.

Повышения напряжения в сетях 6-35 кВ при неполнофазных режимах работы сети.

При обрывах проводов воздушных линий электропередачи (ВЛ) либо отказах выключателей в сетях 6-35 кВ возникает неполнофазный режим. Часть емкости сети (оборвавшийся провод ВЛ) теряет непосредст-

венную связь с источником питания и оказывается подключенной к нему через один или несколько трансформаторов с изолированными нейтралями. Емкости сети и оторвавшегося провода ВЛ образуют контуры с нелинейными индуктивностями фаз силовых трансформаторов, в которых возможны нелинейные колебания, сопровождающиеся длительно существующими перенапряжениями, опасными для оборудования, в первую очередь, трансформаторов напряжения и ОПН.

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

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

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

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

Поиск места повреждения необходимо производить аналогично поиску места однофазного замыкания на землю в сети. Начинать поиск нужно отключением наименее загруженного присоединения, после чего производится оперативное включение отключившейся части сети на время, достаточное для контроля напряжения. Если напряжение на какой-либо фазе превышает более чем в два раза величину наибольшего рабочего, снова отключают проверяемую часть сети, включают присоединение, отключают следующий и повторяют эти операции до тех пор, пока не будет найдено присоединение, вызвавшее срабатывание защиты от повышения напряжения.