**Дисциплина: Эксплуатация оборудования электрических сетей**

**Лекция № 12 «Защита от грозовых и коммутационных перенапряжений»**

Оглавление

[12.1 Эксплуатация защит от прямых ударов молнии и волн грозовых перенапряжений, приходящих с линии электропередачи 1](#_Toc421191463)

[12.2 Техническая документация 2](#_Toc421191464)

[12.3 Вентильные разрядники и ограничители перенапряжений 3](#_Toc421191465)

[12.4. Осмотры и проверки защиты шин и ВЛ от грозовых перенапряжений 9](#_Toc421191466)

[12.5 Особенности эксплуатации сетей с изолированной нейтралью 9](#_Toc421191467)

[12.6 Компенсация ёмкостных токов 10](#_Toc421191468)

[12.7 Смещение нейтралей 11](#_Toc421191469)

[12.8 Феррорезонансные явления в сетях 6,10,35,110 кВ и принятие мер по их предотвращению 12](#_Toc421191470)

# 12.1 Эксплуатация защит от прямых ударов молнии и волн грозовых перенапряжений, приходящих с линии электропередачи

Перенапряжения можно разделить на две группы: атмосферные (внешние или грозовые) и внутренние (коммутационные). Электроустановки должны иметь защиту от грозовых и внутренних перенапряжений, выполненную в соответствии с требованиями правил устройства электроустановок. Линии электропередачи, ОРУ, ЗРУ, распределительные устройства и подстанции защищаются от прямых ударов молнии и волн грозовых перенапряжений, набегающих с линии электропередачи. ВЛ электропередачи 35 кВ и выше защищаются грозозащитным тросом. Защита зданий ЗРУ и закрытых подстанций, а также расположенных на территории подстанций зданий и сооружений осуществляется с помощью заземлённых молниеотводов (тросов), вентильных разрядников, ограничителей перенапряжений. Выбор грозозащитных мероприятий определяется в зависимости от грозовой деятельности района, наличия и отсутствия АПВ, способа заземления нейтрали системы и производится с учётом технико–экономических соображений. Подвеска проводов ВЛ напряжением до 1000В (осветительных, телефонных и т.п.) на конструкциях ОРУ, отдельно стоящих стержневых молниеотводах, прожекторных мачтах, дымовых трубах и градирнях и подводка этих линий к указанным сооружениям, а также подводка этих линий к взрывоопасным помещениям не допускаются. Указанные линии должны выполняться кабелями с металлической оболочкой в земле. Оболочки кабелей должны быть заземлены. Подводка линий к взрывоопасным помещениям должна быть выполнена с учётом требований действующей инструкции по устройству молниезащиты зданий и сооружений. Ежегодно перед грозовым сезоном должна проводиться проверка состояния защиты от перенапряжений распределительных устройств и линий электропередачи и обеспечиваться готовность защиты от грозовых и внутренних перенапряжений. В сетевых предприятиях должны регистрироваться случаи грозовых отключений и повреждений ВЛ, оборудования РУ и ТП. На основании полученных данных должна проводиться оценка надёжности грозозащиты и разрабатываться в случае необходимости мероприятия по повышению ее надёжности. При установке в РУ нестандартных аппаратов или оборудования необходима разработка соответствующих грозозащитных мероприятий.

# 12.2 Техническая документация

При приёмке после монтажа устройств молниезащиты владельцу электроустановки должна быть передана техническая документация. На подстанциях и в организациях, эксплуатирующих электрические сети, должны иметься сведения по защите от перенапряжений каждого РУ и ВЛ:

- очертание защитных зон молниеотводов, прожекторных мачт, металлических и железобетонных конструкций, возвышающихся сооружений и зданий;

- схемы устройств заземления РУ с указанием мест подключения защитных аппаратов, заземляющих спусков подстанционного оборудования и порталов с молниеотводами, расположения дополнительных заземляющих электродов с данными по их длине и количеству;

- паспортные данные по импульсной прочности (импульсные испытательные и пробивные напряжения) оборудования РУ;

- паспортные защитные характеристики использованных на РУ и ВЛ ограничителей перенапряжений, вентильных и трубчатых разрядников и искровых промежутков;

- схемы РУ со значениями длин защищённых тросом подходов ВЛ (для ВЛ с тросом по всей длине - длин опасных зон) и соответствующими им расстояниями по ошиновке между защитными аппаратами РУ и защищаемым оборудованием;

- значения сопротивлений заземления опор ВЛ, в том числе тросовых подходов ВЛ, РУ, ТП и переключательных пунктов;

- данные о проводимости грунтов по трассе ВЛ и территории РУ;

- технический проект молниезащиты, утверждённый в соответствующих органах, согласованный с энергоснабжающей организацией и инспекцией противопожарной охраны;

- акты испытания вентильных разрядников и нелинейных ограничителей напряжения до и после их монтажа;

- протоколы измерения сопротивлений заземления разрядников и молниеотводов.

В эксплуатирующей организации должны храниться следующие систематизированные данные:

- о сопротивлении заземлителей опор, на которых установлены средства молниезащиты, включая тросы;

- о сопротивлении грунта на подходах линий электропередачи к подстанциям;

- о пересечениях линий электропередачи с другими линиями электропередачи, связи и автоблокировки, ответвлениях от ВЛ, линейных кабельных вставках и о других местах с ослабленной изоляцией.

# 12.3 Вентильные разрядники и ограничители перенапряжений

Для защиты изоляционных конструкций РУ от грозовых и коммутационных перенапряжений применяются разрядники и нелинейные ограничители перенапряжения (ОПН). Изменение напряжения и тока сопровождения на разряднике при его пробое (срабатывании) показано на рисунке 1,а. На рисунке 1,б представлена электрическая схема соединения искровых промежутков.



Рис.1,а Изменение тока и напряжения на разряднике при его пробое



Рис. 1,б Электрическая схема соединения искровых промежутков

Основными элементами вентильных разрядников являются искровые промежутки, последовательно соединённые с резистором, имеющим нелинейную вольт-амперную характеристику (ВАХ). В некоторых разрядниках параллельно искровым промежуткам 2, 3 присоединяются шунтирующие резисторы 1 (линейные) и конденсаторы, дающие возможность управлять распределением напряжений различной длительности по искровым промежуткам (рис. 1, б).

На рисунке 2 представлен вентильный разрядник на напряжение 33 кВ, состоящий из фарфоровой покрышки 1, колонки нелинейных резисторов из вилита 2 и блока последовательно соединенных искровых промежутков 3.



Рис.2 Вентильный разрядник

Конструкция ОПН показана на Рис.3.



Рис. 3. Нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН)

Основными элементами ОПН являются фарфоровый корпус 2, фланцы 4, имеющие устройство 3, обеспечивающее герметичность, наружный тороидальный экран 6 с держателями 5, обеспечивающий выравнивание распределения напряжения по варисторам 7. Варисторы имеют внутреннюю полость 1, служащую для сброса избыточного давления при аварийном режиме через клапан взрывобезопасности 3. Тепловая прослойка 8, передающая избыток теплоты от варисторов на корпус, одновременно используется для крепления варисторов 7. В последнее время для изготовления корпусов ОПН стали применять полимерные материалы, например стеклопластик, что позволяет существенно снизить массу аппаратов и упростить конструкцию ОПН. Одним из основных недостатков вентильных разрядников является высокое значение коэффициента нелинейности материалов (тервита и вилита) = (0,2—0,4), а также нестабильность напряжений пробоя. Поэтому значительный прогресс был достигнут после разработки новых оксидно-цинковых варисторов с коэффициентом нелинейности = 0,02. Это позволило разработать аппараты защиты без искровых промежутков. При рабочем напряжении токи через варисторы составляют миллиамперы, а при перенапряжениях соответственно сотни и тысячи ампер. Ограничитель подсоединён к сети в течение всего срока службы. Поэтому через варисторы непрерывно протекает ток. Ограничитель сохраняет работоспособность до тех пор, пока воздействием рабочего напряжения и импульсов перенапряжений активная составляющая тока не превысит некоторого критического значения, при котором нарушается тепловое равновесие аппарата. Поглощение ограничителем энергии из сети предшествует повышению перенапряжения. Кратность ограничения перенапряжений ОПН имеет порядок 1,75 (для коммутационных) и соответственно 2,42—1,8 (для грозовых), что значительно ниже, чем для вентильных разрядников, и, самое главное, обеспечивается стабильность этого коэффициента.

Вентильные разрядники и ограничители перенапряжений всех напряжений должны быть постоянно включены. В ОРУ допускается отключение на зимний период (или отдельные его месяцы) вентильных разрядников, предназначенных только для защиты от грозовых перенапряжений в районах с ураганным ветром, гололёдом, резкими изменениями температуры и интенсивным загрязнением.

Профилактические испытания вентильных разрядников и ограничителей перенапряжений должны проводиться в соответствии с Объёмом и нормами испытаний электрооборудования.

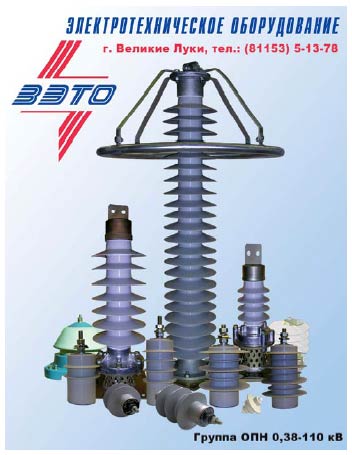
Ограничители перенапряжений по размеру гораздо меньше, чем разрядники и по конструктивным особенностям надёжнее их в эксплуатации, при обслуживании более экономичны. Защитные характеристики более совместимы с современными видами оборудования (см. рисунок 4).

Рис. 4 Типы ОПН, выпускаемые Великолукским завом электротехнического оборудования

В зависимости от типов разрядников и ограничителей перенапряжений производится:

1. Измерение сопротивления разрядников и ограничителей перенапряжения.

2. Измерение тока проводимости вентильных разрядников выпрямленным напряжением.

3. Измерение тока проводимости ограничителей перенапряжений.

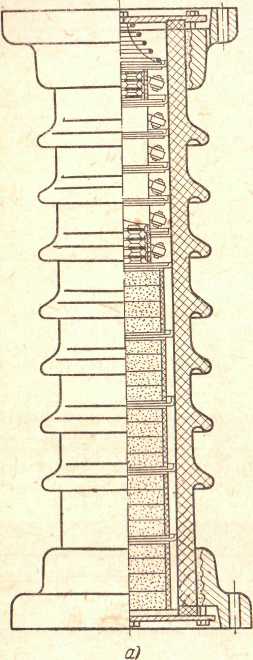
4. Измерение пробивного напряжения вентильных разрядников (с искровыми промежутками).

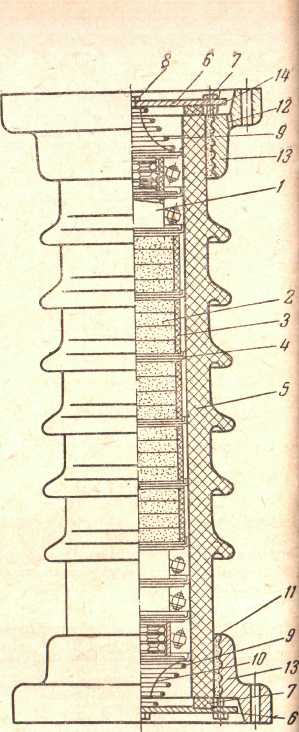
5. Тепловизионный контроль вентильных разрядников и ограничителей перенапряжений.

6. Проверка герметичности разрядников.

Трубчатые разрядники и защитные промежутки (если они ещё остались в эксплуатации) должны осматриваться при обходах линий электропередачи. Срабатывание разрядников отмечается в обходных листах. Проверка трубчатых разрядников со снятием с опор проводится 1 раз в 3 года.

Как показывает статистика аварий, основной причиной нарушений эксплуатационной надёжности вентильного разрядника является проникновение влаги в его внутреннюю полость и в особенности в область искрового промежутка. Смотри рисунок 5 и 6. Возникновение проводящих мостиков, разрушающих промежутки, и отсыривание шунтирующих сопротивлений могут привести к неравномерному распределению восстанавливающегося напряжения между единичными промежутками и к отказу в гашения сопровождающего тока с последующим разрушением (взрывом) разрядника. В некоторых случаях проводящие мостики могут вызвать разрушение разрядника и при рабочем напряжении без перенапряжений.





**б)**

Рис. 5 Элементы вилитового разрядника серии РВС

а - РВС-30; б— РВС-20; 1—комплект искровых промежутков: 2—вилитовые диски изолирующая обмазка на блоке дисков; 4 — фиксатор (картонная звездочка);

5-фарфоровый чехол; 6 — стальной уплотняющий диск (в некоторых исполнениях силуминовый и латунный с прокладкой из толя); 7 — кольцевое резиновое уплотнение; 8 - болт, закрывающий отверстие, предназначенный для проверки герметичности; 9 -пружина; 10— шунтирующая лента; 11 — цемент; 12—капельница; 13 — фланец (силумин); 14 — болт.

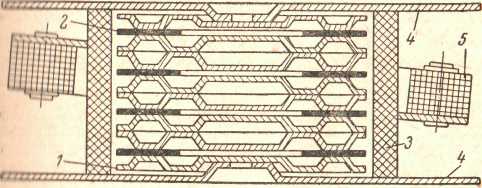


Рис. 6 Элемент искрового промежутка разрядника серии РВС

1 – латунная шайба; 2—миканитовая шайба; 3 — фарфоровая труба; 4 — латунная крышка; 5 —шунтирующее сопротивление.

Отложение продуктов коррозии на электродах искровых промежутков снижает разрядное расстояние между ними (а в некоторых случаях приводит к закорачиванию части промежутков), что создаёт опасность их пробоя при незначительных коммутационных перенапряжениях или даже в нормальном режиме. Влага, попадающая на рабочие сопротивления, разрушает структуру вентильных дисков, а в некоторых случаях создаёт возможность перекрытия дисков по поверхности. Увлажнение вилитовых сопротивлений может привести к заметному ухудшению их защитных характеристик - повышению коэффициента вентильности, уменьшению пропускной способности. Принятая в практике методика электрических профилактических испытаний вентильных разрядников предусматривает в качестве основного критерия для оценки состояния разрядника результаты измерений тока проводимости искрового промежутка (при наличии шунтирующих сопротивлений) или токов утечки (без шунтирующих сопротивлений) при приложении выпрямленного повышенного напряжения. Повышенные токи проводимости (утечки) свидетельствуют о наличии влаги. Резкое уменьшение токов проводимости чаще всего возникает из-за обрыва в цепи шунтирующих сопротивлений. Существенные данные о состоянии разрядника могут дать также измерения пробивного напряжения искрового промежутка разрядников при приложении повышенного напряжения промышленной частоты (для разрядников 6-10 кВ). Увеличение разрядного напряжения может иметь место вследствие повреждения деталей искрового промежутка, понижение - также вследствие повреждений или коррозирования электродов. При оценке состояния разрядников по результатам испытаний не­обходимо совместно рассмотреть результаты всех выполненных замеров и, в частности, данные предыдущих испытаний. Незначительные отклонения от нормальных значений тока и про­бивного напряжения искрового промежутка могут быть вызваны неточ­ностью сборки или повреждениями в пределах, не нарушающих нор­мальной работы разрядников; с другой стороны, такие отклонения дают основания подозревать наличие начальной стадии процессов, сопут­ствующих проникновению влаги внутрь промежутка. Измерения тока проводимости и тока утечки в искровых промежутках разрядников производится при приложении повышенного выпрямленного напряжения. Измерение пробивного напряжения вентильных разрядников специальной установкой переменным напряжением (током) промышленной частоты.

# 12.4. Осмотры и проверки защиты шин и ВЛ от грозовых перенапряжений

Верховой осмотр без снятия с опор, а также дополнительные осмотры и проверки вентильных и трубчатых разрядников, установленных в зонах интенсивного загрязнения, должны выполняться в соответствии с требованиями местных инструкций. Ремонт трубчатых разрядников должен выполняться по мере необходимости в зависимости от результатов проверок и осмотров. Осмотр средств защиты от перенапряжений на подстанциях должен проводиться:

- в установках с постоянным дежурством персонала - во время очередных обходов, а также после каждой грозы, вызвавшей работу релейной защиты на отходящих ВЛ;

- в установках без постоянного дежурства персонала - при осмотрах всего оборудования.

На ВЛ напряжением до 1000В перед грозовым сезоном выборочно должна проверяться исправность заземления крюков и штырей изоляторов, установленных на железобетонных опорах, а также арматуры этих опор. При наличии нулевого провода контролируется также зануление этих элементов. На ВЛ, построенных на деревянных опорах, проверяются заземление и зануление крюков и штырей изоляторов на опорах, имеющих защиту от грозовых перенапряжений, а также там, где выполнено повторное заземление нулевого провода.

# 12.5 Особенности эксплуатации сетей с изолированной нейтралью

В сетях с изолированной нейтралью или с компенсацией ёмкостных токов допускается работа воздушных и кабельных линий электропередачи с замыканием на землю до устранения повреждения. При этом к отысканию места повреждения на ВЛ, проходящих в населённой местности, где возникает опасность поражения током людей и животных, следует приступить немедленно и ликвидировать повреждение в кратчайший срок. При наличии в сети в данный момент замыкания на землю отключение дугогасящих реакторов не допускается. В электрических сетях с повышенными требованиями по условиям электробезопасности людей работа с однофазным замыканием на землю не допускается. В этих сетях все отходящие от подстанции линии должны быть оборудованы защитами от замыканий на землю.В сетях генераторного напряжения, а также в сетях, к которым подключены электродвигатели высокого напряжения, при появлении однофазного замыкания в обмотке статора машина должна автоматически отключаться от сети, если ток замыкания на землю превышает 5 А. Если ток замыкания не превышает 5 А, допускается работа не более 2 ч., по истечении которых машина должна быть отключена. Если установлено, что место замыкания на землю находится не в обмотке статора, по усмотрению технического руководителя допускается работа вращающейся машины с замыканием в сети на землю продолжительностью до 6 ч.

# 12.6 Компенсация ёмкостных токов

Компенсация ёмкостного тока замыкания на землю дугогасящими реакторами должна применяться при ёмкостных токах, превышающих следующие значения:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Номинальное напряжение сети, кВ | 6 | 10 | 15- 20 | 35 и выше |
| Ёмкостный ток замыкания на землю, А | 30 | 20 | 15 | 10 |

В сетях напряжением 6-35 кВ с ВЛ на железобетонных и металлических опорах дугогасящие аппараты применяются при ёмкостном токе замыкания на землю более 10 А. Работа сетей напряжением 6-35 кВ без компенсации ёмкостного тока при его значениях, превышающих указанные выше, не допускается. Для компенсации ёмкостного тока замыкания на землю в сетях должны использоваться заземляющие дугогасящие реакторы с автоматическим или ручным регулированием тока. Измерения ёмкостных токов, токов дугогасящих реакторов, токов замыкания на землю и напряжений смещения нейтрали должны проводиться при вводе в эксплуатацию дугогасящих реакторов и при значительных изменениях режимов работы сети, но не реже 1 раза в 6 лет. Мощность дугогасящих реакторов должна быть выбрана по ёмкостному току сети с учётом ее перспективного развития. Заземляющие дугогасящие реакторы должны устанавливаться на подстанциях, связанных с компенсируемой сетью не менее чем двумя линиями электропередачи. Установка реакторов на тупиковых подстанциях не допускается. Дугогасящие реакторы должны подключаться к нейтралям трансформаторов через разъединители. Для подключения дугогасящих реакторов, как правило, должны использоваться трансформаторы со схемой соединения обмоток "звезда-треугольник". Подключение дугогасящих реакторов к трансформаторам, защищённым плавкими предохранителями, не допускается. Ввод дугогасящего реактора, предназначенный для заземления, должен быть соединён с общим заземляющим устройством через трансформатор тока. Дугогасящие реакторы должны иметь резонансную настройку. Допускается настройка с перекомпенсацией, при которой реактивная составляющая тока замыкания на землю должна быть не более 5 А, а степень расстройки - не более 5%. Если установленные в сети напряжением 6÷20 кВ дугогасящие реакторы имеют большую разность токов смежных ответвлений, допускается настройка с реактивной составляющей тока замыкания на землю не более 10 А. В сетях напряжением 35 кВ при емкостном токе менее 15 А допускается степень расстройки не более 10%. Применение настройки с недокомпенсацией допускается временно при условии, что аварийно возникающие несимметрии ёмкостей фаз сети (например, при обрыве провода) приводят к появлению напряжения смещения нейтрали, не превышающего 70% фазного напряжения. В сетях напряжением 6÷10 кВ, как правило, должны применяться плавно регулируемые дугогасящие реакторы с автоматической настройкой тока компенсации. При применении дугогасящих реакторов с ручным регулированием тока показатели настройки должны определяться по измерителю расстройки компенсации. Если такой прибор отсутствует, показатели настройки должны выбираться на основании результатов измерений токов замыкания на землю, ёмкостных токов, тока компенсации с учётом напряжения смещения нейтрали. В установках с вакуумными выключателями, как правило, должны быть предусмотрены мероприятия по защите от коммутационных перенапряжений. Отказ от защиты от перенапряжений должен быть обоснован. Потребитель, питающийся от сети, работающей с компенсацией ёмкостного тока, должен своевременно уведомлять оперативный персонал энергосистемы об изменениях в своей схеме сети для перестройки дугогасящих реакторов.

# 12.7 Смещение нейтралей

В сетях, работающих с компенсацией ёмкостного тока, напряжение несимметрии должно быть не выше 0,75% фазного напряжения. При отсутствии в сети замыкания на землю напряжение смещения нейтрали допускается не выше 15% фазного напряжения длительно и не выше 30% в течение 1 часа. Снижение напряжения несимметрии и смещения нейтрали до указанных значений должно быть осуществлено выравниванием ёмкостей фаз сети относительно земли (изменением взаимного положения фазных проводов, распределением конденсаторов высокочастотной связи между фазами линий). При подключении к сети конденсаторов высокочастотной связи и конденсаторов молниезащиты вращающихся машин должна быть проверена допустимость несимметрии ёмкостей фаз относительно земли. Пофазные включения и отключения воздушных и кабельных линий электропередачи, которые могут приводить к напряжению смещения нейтрали, превышающему указанные значения, не допускаются

# 12.8 Феррорезонансные явления в сетях 6,10,35,110 кВ и принятие мер по их предотвращению

Причиной внутренних (коммутационных) перенапряжений могут быть различные переходные процессы, сопровождающие резкие изменения режима работы электрической системы. С точки зрения воздействия на изоляцию наиболее существенными являются перенапряжения, возникающие при:

а) однофазных замыканиях на землю через дугу в сетях с изолированной нейтралью и с нейтралью, заземлённой че­рез большое активное или реактивное сопротивление;

б) отключении индуктивностей, сопровождающемся при­нудительным ускорением гашения выключаемого тока;

в) отключении ёмкостей;

г) резонансе и феррорезонансе в сети или части сети;

На подстанциях напряжением 110÷220 кВ для предотвращения возникновения перенапряжений от самопроизвольных смещений нейтрали или опасных феррорезонансных процессов оперативные действия должны начинаться с заземления нейтрали трансформатора, включаемого в ненагруженную систему шин с трансформаторами напряжения НКФ-110 и НКФ-220. Перед отделением от сети ненагруженной системы шин с трансформаторами типа НКФ-110 и НКФ-220 нейтраль питающего трансформатора должна быть заземлена. Распределительные устройства напряжением 150÷220 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, контакты которых шунтированы конденсаторами, должны быть проверены на возможность возникновения феррорезонансных перенапряжений при отключениях систем шин. При необходимости должны быть приняты меры к предотвращению феррорезонансных процессов при оперативных и автоматических отключениях. В сетях и на присоединениях напряжением 6÷35 кВ в случае необходимости должны быть приняты меры к предотвращению феррорезонансных процессов, в том числе самопроизвольных смещений нейтрали. Неиспользуемые обмотки низшего (среднего) напряжения трансформаторов и автотрансформаторов должны быть соединены в звезду или треугольник и защищены от перенапряжений. Защита не требуется, если к обмотке низшего напряжения постоянно подключена кабельная линия электропередачи длиной не менее 30 м. В других случаях защита неиспользуемых обмоток низшего и среднего напряжения должна быть выполнена заземлением одной фазы или нейтрали либо вентильными разрядниками или ограничителями перенапряжения, присоединёнными к выводу каждой фазы. В сетях напряжением 110 кВ и выше разземление нейтрали обмоток напряжением 110 – 220 кВ трансформаторов, а также логика действия релейной защиты и автоматики должны быть осуществлены таким образом, чтобы при различных оперативных и автоматических отключениях не выделялись участки сети без трансформаторов с заземленными нейтралями. Защита от перенапряжений нейтрали трансформатора с уровнем изоляции ниже, чем у линейных вводов, должна быть осуществлена вентильными разрядниками или ограничителями перенапряжений.

В сетях напряжением 110 - 750 кВ при оперативных переключениях и в аварийных режимах повышение напряжения промышленной частоты (50Гц) на оборудовании должно быть в пределах значений указанных в ПТЭ.

К последним разработкам в области предотвращения развития резонансных процессов относятся анти резонансные трансформаторы напряжения 6-220 кВ. На рисунке7 представлен трансформатор напряжения электромагнитный анти резонансный НАМИ-110.

Рис. 7. Трансформатор напряжения НАМИ-110.

Основным мероприятием, исключающим повреждения трансформаторов напряжения в сетях 6-35 кВ, является применение "антирезонансных" трансформаторов напряжения типов НАМИ-6, НАМИ-10 и НАМИ-35. Анти резонансный трансформатор НАМИ не вступает в резонанс с ёмкостью ненагруженных шин и линий любой протяжённости, а также выдерживает без ограничения длительности как любые виды однофазных замыканий в сети, в том числе через перемежающуюся дугу, так и повышения напряжения, вызванные феррорезонансом ёмкости сети с другими трансформаторами (силовыми или напряжения). Трансформаторы НАМИ имеют специальную схему соединения обмоток и пониженную номинальную индукцию (см. рисунок 8). В баке анти резонансного трансформатора размещаются два трансформатора (трёхфазный и однофазный), имеющие отдельные магнитопроводы. В нейтраль высоковольтной обмотки трёхфазного трансформатора, имеющего вторичную (компенсационную) обмотку, соединённую треугольником, включён однофазный трансформатор, который измеряет напряжение нулевой последовательности. Предотвращению феррорезонанса способствует то, что в контур нулевой последовательности входит только одна индуктивность намагничивания однофазного трансформатора, и этот феррорезонансный контур лишён источника э.д.с. Все анти резонансные свойства трансформаторов НАМИ экспериментально проверены в действующих сетях.

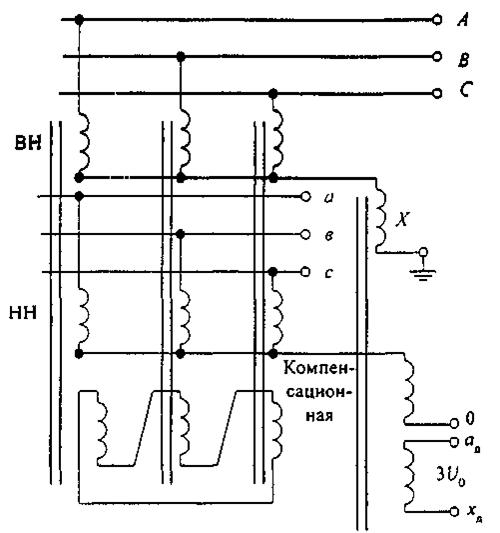


Рис. 8 Схема соединения обмоток трансформатора напряжения