

На правах рукописи

КОЛЫЧЕВ Александр Валерьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ НА ПОКАЗАТЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ  
ЗАЩИТЫ ПОДСТАНЦИЙ 35 - 500 КВ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

Специальность 05.14.12 - Техника высоких напряжений

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2002

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном техническом университете.

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор Халилов Ф.Х.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
профессор Ефимов Б.В.

кандидат технических наук,  
доцент Гольдштейн В.Г.

Ведущая организация – Петербургский Энергетический институт повышения  
квалификации руководящих работников и специалистов  
(ПЭИПК) Минтопэнерго РФ

Защита состоится “ \_\_\_\_ ” “ \_\_\_\_\_ ” 2002 г. в \_\_\_\_ часов в ауд.  
главного здания на заседании диссертационного совета К-212.229.03.  
Санкт-Петербургского государственного технического университета  
(195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, а. 325 Гз.).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке  
университета.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” “ \_\_\_\_\_ ” 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета К-212.229.03.

Гумерова Н.И.

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Защита от грозových и внутренних перенапряжений в энергосистемах осуществляется с помощью принятия специальных мер, которые предусмотрены в ПТЭ, ПУЭ и РУ по защите от перенапряжений. Одними из основных мер защиты электрооборудования электрических сетей до сих пор являются вентильные разрядники (РВ).

Необходимость замены вентильных разрядников 35 кВ и выше на нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) вызвана следующими обстоятельствами: 1) промышленностью страны практически приостановлен выпуск вентильных разрядников по ГОСТ 16357-83 (серии РВМК, РВМГ, РВМ, РВС); 2) наличие в разрядниках искровых промежутков из цветных металлов и большая материалоемкость приводит к тому, что эти защитные аппараты оказываются тяжелыми, громоздкими, а также достаточно дорогими; 3) большинство вентильных разрядников 35 кВ и выше эксплуатируются более 25 лет. По различным причинам эти аппараты исчерпали свой ресурс по пропускной способности и по защитным характеристикам; 4) вентильные разрядники в ряде случаев не обеспечивают обоснованных технико-экономических показателей защиты от грозových перенапряжений; 5) при коммутациях ненагруженных участков сборных шин подстанций 110 кВ и выше разъединителями наблюдаются случаи разрушения вентильных разрядников, устанавливаемых на подстанциях. Это приводит к серьезным авариям, простоем оборудования на длительный период; 6) защитные характеристики вентильных разрядников, проработавших более 20÷25 лет, ухудшаются. Вольтамперная характеристика (ВАХ) разрядников смещается вверх приблизительно на 15÷20 %, а вольтсекундная характеристика (ВСХ) - в большинстве случаев снижается, а в ряде случаев растет.

Замена вентильных разрядников на нелинейные ограничители должна выполняться таким образом, чтобы ограничители 35 кВ и выше не вызывали серьезных проектных, строительных и эксплуатационных работ и расходов. Поэтому они должны быть подключены в тех же точках (присоединениях), где в настоящее время установлены вентильные разрядники. Однако и при такой “простой” замене вентильных разрядников на нелинейные ограничители перенапряжений возникает ряд проблем, без решения которых эксплуатация сетей невозможна.

В ряде энергосистем “простая” замена РВ на ОПН привела к повреждению не только самих защитных аппаратов, но и защищаемого электрооборудования. По этой причине у эксплуатационного персонала появилось негативное

отношение к новейшим защитным аппаратам - нелинейным ограничителям перенапряжений.

До прекращения выпуска разрядников установка ОПН выполнялась для вновь вводимых в эксплуатацию объектов, а в рамках разработки защиты от внутренних перенапряжений проводились все необходимые расчеты аварийных и послеаварийных режимов. Соответственно по полученным результатам разрабатывались мероприятия по защите электрооборудования и линий. Однако единой методики выбора ОПН не существовало. Поэтому в последние годы, из-за экономического хаоса в стране при замене разрядников на ОПН, эксплуатирующие, некоторые проектные организации, а также заводы – изготовители не производили необходимых расчетов, что привело к значительному увеличению количества отказов ОПН. Например, к нарушениям условий правильной эксплуатации ОПН можно отнести случаи возникновения феррорезонансных явлений, загрязнение внешней изоляции защитных аппаратов выше нормированного уровня, нарушение режима заземления нейтрали, частые коммутации электрооборудования и линий и т.д.

**Цель и задачи работы** - исследование влияния изменения характеристик вентильных разрядников на показатель надежности грозозащиты подстанций 35÷500 кВ; исследование вопроса надежной работы ОПН при замене ими вентильных разрядников; разработка рекомендаций по установке ОПН.

**Личный вклад автора в работу** - проведены исследования грозозащиты типовых подстанций 35-500 кВ и импульсных токов через защитные аппараты по усовершенствованной методике; проведены исследования, позволяющие определить срок службы ОПН.

**Научная новизна.** Получены достоверные данные о состоянии характеристик вентильных разрядников после 15 ÷25 лет их эксплуатации в сетях; показано, что ухудшение электрических характеристик упомянутых защитных аппаратов в несколько раз снижает показатель надежности грозозащиты (число лет безаварийной работы при грозовых ситуациях) подстанций; получены характеристики показателя надежности работы электрооборудования сетей 35 - 500 кВ при грозовых и внутренних перенапряжениях; даны перспективные технические условия работы новейших защитных аппаратов - нелинейных ограничителей перенапряжений.

**Практическая ценность** полученных результатов состоит в следующем: 1) разработана методика отбраковки вентильных разрядников по изменению их защитных характеристик; 2) даны рекомендации по замене вентильных разрядников на нелинейные ограничители перенапряжений; 3) разработаны реко-

мендации, предотвращающие повреждение ограничителей перенапряжений в условиях их эксплуатации; 4) даны исходные данные, необходимые для безаварийной эксплуатации нелинейных ограничителей перенапряжений.

**Реализация результатов работы.** Обоснованный переход от вентильных разрядников к нелинейным ограничителям перенапряжений внедрен в энергосистемах РАО “ЕЭС России” и в ряде промышленных предприятий России, в разработках АООТ “НИИ Электрокерамика” и ЗАО ”НИИ Защитных аппаратов и изоляторов”.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на четвертой и пятой Российских научно-технических конференциях “Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов” ( г. Санкт-Петербург, 1996, 1998 г.г.), на совещаниях “Эксплуатация, производство и обеспечение качества защитных средств от перенапряжений в классе 110 кВ и выше” (г. Санкт-Петербург, 1996 г.), “Эксплуатация, производство и обеспечение качества защитных средств от перенапряжений в классе 0,5÷35 кВ” (г. Санкт -Петербург, 1997 г.), “Современные проблемы эксплуатации электрооборудования при возникновении перенапряжений в сетях различных классов напряжения и способы их ограничения” (г. Санкт-Петербург, 1998 г.), “Современное состояние и проблемы диагностики высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения, силовых конденсаторов и батарей конденсаторов” (Воткинская ГЭС, 1998 г.).

### **Публикации.**

По результатам работы опубликовано 6 печатных работ.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список литературы из 63 наименований. Основной материал изложен на 285 страницах машинописного текста, включая 109 рисунков и 104 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** отражена актуальность темы и очерчен круг вопросов, которые исследуются в диссертации.

**В первой главе** проведен анализ состояния защитных характеристик вентильных разрядников (РВ), используемых в эксплуатации в настоящее время. Приведен литературный обзор, в котором отражены различные представления о причинах, вызвавших старение нелинейных сопротивлений (НС) от нагрузки и от времени эксплуатации, приведены данные об изменении пробивного напряжения искровых промежутков РВ. На основании литературного обзора, сделан вывод о том, что для вентильных разрядников, чей срок эксплуатации более 15 лет, велика вероятность изменения основных защитных характеристик, а именно: а) увеличение остающегося напряжения как при малых, так и при больших токах в пределах от 15 до 20 %; б) значительное снижение ресурса по пропускной способности; в) снижение импульсного пробивного напряжения (ВСХ) до - 30 % с одной стороны из-за уменьшения давления внутри аппаратов, с другой из-за провалов ВСХ в микросекундном диапазоне; г) увеличение пробивного напряжения при 50 Гц до 5-10 %; д) в ряде случаев подъем ВСХ на 15÷20 %.

Проведен анализ причин изменения вольтамперной характеристики (ВАХ) нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) 35-500 кВ. По результатам экспериментальных исследований сделан вывод об изменении ВАХ варистора при воздействии импульсов в области малых и больших токов. Эти изменения выражаются в снижении классификационного напряжения, а также в повышении остающихся напряжений в режиме ограничения. Изменение ВАХ объяснено прожогами части полупроводниковых переходов в поликристаллической структуре варистора с образованием участков с линейной ВАХ и удельным сопротивлением, меньшим, чем статическое сопротивление в области малых токов, по сравнению с неповрежденными переходами. Поэтому при больших токах теряются одна или несколько из параллельных ветвей тока, что приводит к увеличению остающегося напряжения, а при малых токах наоборот одна или несколько из параллельных ветвей микроваристора шунтирует другие параллельные ветви и теряется одно из последовательно соединенных сечений микроваристоров, уменьшая величину напряжения при фиксированном значении тока.

В современной литературе об изменении ВАХ ОПН статистических данных достаточно мало, что связано с тем, что большинство ОПН в энергосистемах работают не более 20 лет. Случаи, которые приводили к выходу ограничителя из строя, связаны в основном с работой ОПН в режимах с нерасчетными воздействиями, превышающими нормированные. Изменение ВАХ ОПН также связано с выработкой ресурса по пропускной способности.

В главе проведен анализ показателя надежности грозозащиты при номинальных характеристиках РВ и современного состояния защиты от внутренних перенапряжений подстанций 35-500 кВ.

ПУЭ не нормирует показатель надежности грозозащиты подстанций, а определяет только длину тросового подхода и расстояние от электрооборудования до ближайшего защитного устройства. По этой причине, важна обработка первичных данных энергосистем. Она показала, что в год в нормальных схемах грозозащиты происходит одно повреждение на ~ 600 подстанций 35 и 110 кВ, ~ 750 подстанций 150 кВ. Для подстанций 220 кВ и выше эти характеристики грозозащиты определить не удалось из-за ограниченного объема информации.

Специальный анализ технико-экономических аспектов грозозащиты подстанций показывает, что эксплуатационный показатель надежности грозозащиты при установке на подстанциях вентильных разрядников II и III групп приблизительно в 2,0 - 1,5 раз меньше, чем это требуется эксплуатацией.

**Во второй главе** приводятся усовершенствованная методика исследования грозовых и внутренних перенапряжений, а также методика исследования токов через защитные аппараты.

Исследование грозовых перенапряжений выполнялось с помощью численных методов на ПЭВМ.

Рассматривая различные случаи поражения линии от прямых ударов молнии в непосредственной близости от подстанции, затем на некотором удалении от подстанции, можно несколько раз определить области опасных волн, при которых напряжение на обследуемом аппарате превысит допустимый уровень. Совершенно ясно, что по мере удаления точки удара молнии, площади областей опасных волн будут уменьшаться до тех пор, пока за пределами опасной зоны не станут нулевыми.

Такой подход приводит к трехмерному объему опасных волн. Вводя плотности вероятностей амплитуд и крутизны токов молнии и вероятное число поражений участков линий на единицу длины, можно определить надежность грозозащиты подстанций путем интегрирования по всему объему.

Эквивалентная схема подстанций в однофазной постановке включала в себя наиболее ответственные аппараты (трансформаторы, шунтирующие реакторы, выключатели, конденсаторы связи и др.), которые моделируются входными емкостями, защитные аппараты - вентильные разрядники или ОПН, замещаются нелинейными активными сопротивлениями. Моменты перекрытия искровых промежутков разрядников и линейной изоляции ВЛ на подходе

определяются по их вольтсекундным характеристикам. Все участки ошиновки между узлами подстанции замещаются отрезками линий без потерь.

Каждая молния моделировалась полубесконечной длинной линией с волновым сопротивлением, равным условному волновому сопротивлению канала  $Z_M$ . По этой линии к пораженной ВЛ распространялась волна напряжения  $U_M(t)$ , связанная с волной тока молнии  $i_M(t)$ . Волна имела косоугольный фронт длительностью  $\tau_\phi$  и линейно спадающий хвост с временем полуспада  $\tau_n$ .

Воздействие подавалось на ВЛ вблизи опоры непосредственно на фазный провод 1 (прорывы мимо тросовой защиты), либо на трос 2 (обратные перекрытия) в месте их присоединения к опоре (рис.1).

Принципиальная расчетная схема грозозащиты ВЛ- подстанции.

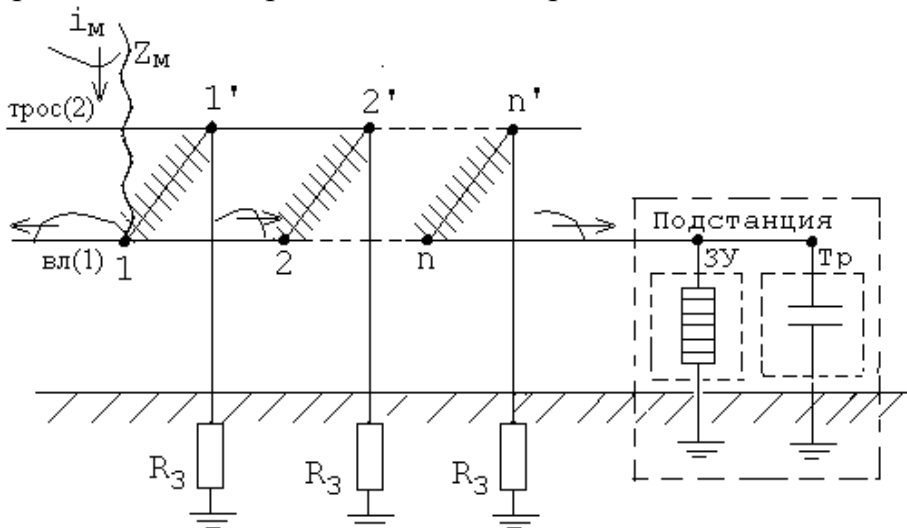


Рис.1

При развитии переходного процесса линейная изоляция между проводом и тросом перекрывается под действием разности потенциалов  $U_1' - U_1$ , в соответствии с ее вольтсекундной характеристикой.

Ядром методики являлось численное моделирование волнового процесса в системе молния - ВЛ - подстанция. Оно основывается на решении телеграфных уравнений для напряжений в виде суммы прямых и обратных волн, распространяющихся по проводам со скоростью света. Для численной реализации все волны записываются в виде последовательности прямоугольных волн длительностью  $\Delta t$  каждая. Перемещение их, деформация, преломление и отражение от узлов определяют в совокупности волновой процесс в схеме.

Для ВЛ при расчете напряжений в узловых точках используется правило эквивалентной волны и эквивалентной ЭДС в многопроводной постановке. Импульсная корона на проводах моделируется в программе динамическими



емкостями, а потери в земле и проводах с учетом поверхностного эффекта - RL-двухполюсниками. Вследствие этих двух причин (корона и потери) волны при распространении вдоль ВЛ искажаются и затухают.

Приведена методика расчета импульсных и коммутационных токов через ОПН.

Импульсные токи через варисторы ОПН, устанавливаемых на подстанциях, определялись по ходу построения кривых опасных волн (КОВ).

При снятии КОВ импульсное напряжение на изоляции электрооборудования (например, силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов, измерительных трансформаторов и др.) повышалось до тех пор, пока их амплитуда не “коснется” уровня допустимых импульсных воздействий  $U_{доп}(t)$ .

При “касании” кривой импульсных перенапряжений на изоляции электрооборудования и  $U_{доп}(t)$ , представляющего собой прямую, параллельную оси абсцисс, фиксировалась осциллограмма тока через варисторы ОПН.

Коммутационные токи через защитные аппараты 35 ÷ 500 кВ определялись, исходя из ожидаемых (с достаточно малой вероятностью) коммутационных перенапряжений (в сетях 35 кВ, кроме того, дуговых перенапряжений), параметров защитных аппаратов, схемы передачи, мощности (предвключенной реактивности) питающей подстанции, места установки защитных аппаратов. При этих условиях коммутационный ток через ограничитель перенапряжений определен по формуле

$$I_{опп} = \frac{U_{фm} (K - K_{ост})}{Z_{в}} A ,$$

где  $U_{фm}$  - амплитуда фазного напряжения в точке установки ОПН;  $K$  - максимальная кратность неограниченных перенапряжений;  $K_{ост}$  - кратность остающегося напряжения на ОПН, обеспечивающего координацию;  $Z_{в}$  - волновое сопротивление канала фаза-земля;  $A$  - множитель, величина которого зависит от конфигурации сети и места установки ОПН.

Методика прогнозирования ожидаемого срока службы ОПН учитывала: статистическое распределение амплитуды неограниченных перенапряжений, характеристики защитных аппаратов и статистическое распределение ресурса, расходуемого варисторами ОПН в течение года.

**В третьей главе** исследована надежность грозозащиты типовых подстанций 35-500 кВ и импульсных токов, протекающих через защитные аппараты для наиболее распространенных схем.

Исследование грозозащиты проводилось при использовании на подстанциях защитных аппаратов с гостированными и измененными характеристиками. Под измененными характеристиками рассматривалось: для вентильных разрядников - подъем вольтамперной характеристики и импульсного пробивного напряжения на 20%; для нелинейных ограничителей перенапряжений - увеличение коэффициента нелинейности  $\alpha$  на 50%.

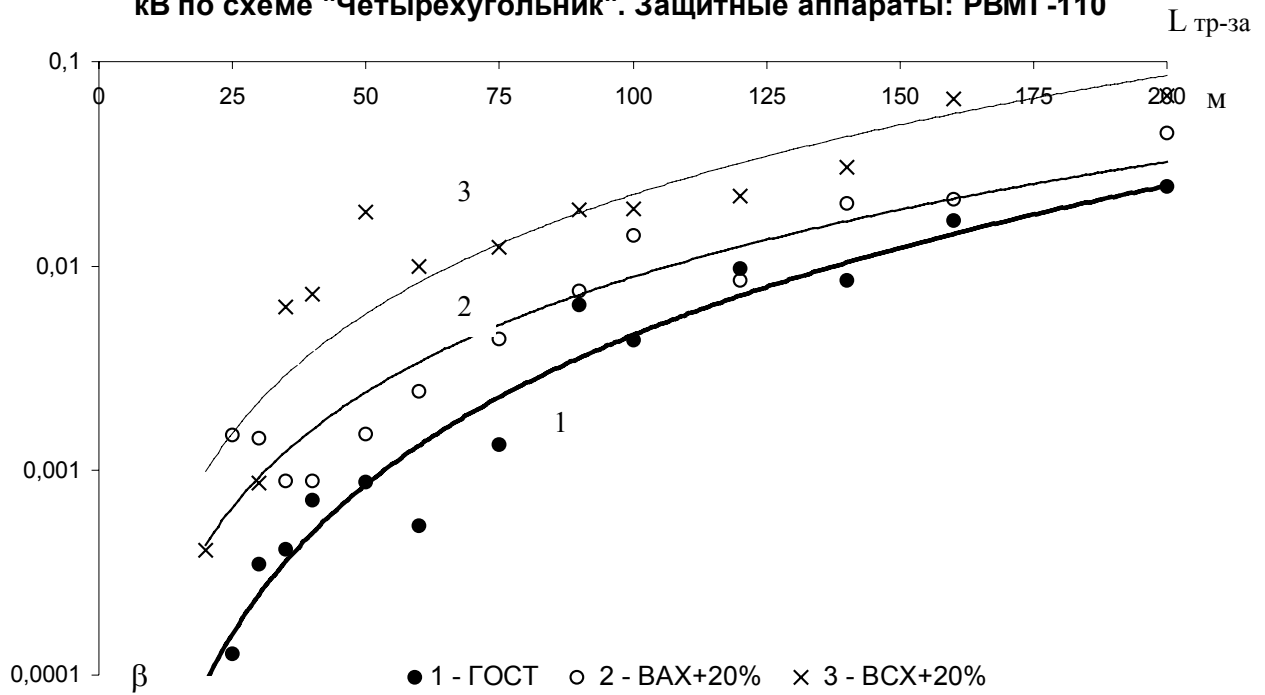
Оказалось, что подъем вверх на 20 % ВАХ РВ: во-первых ухудшает показатель надежности  $M = 1/\beta$  грозозащиты подстанций: в сетях 35 кВ на порядок, для подстанций 110-330 кВ в 2-5 раз, для подстанций 500 кВ в 1,25-1,5 раза; во вторых не обеспечивает оптимальный технико-экономический показатель грозозащиты подстанций 35-500 кВ. Смещение вверх импульсного пробивного напряжения ухудшает показатель  $M$  в 5 раз и более.

В качестве примера на рис.2. приведены результаты исследования грозозащиты проходной подстанции 110 кВ по схеме "Четырехугольник".

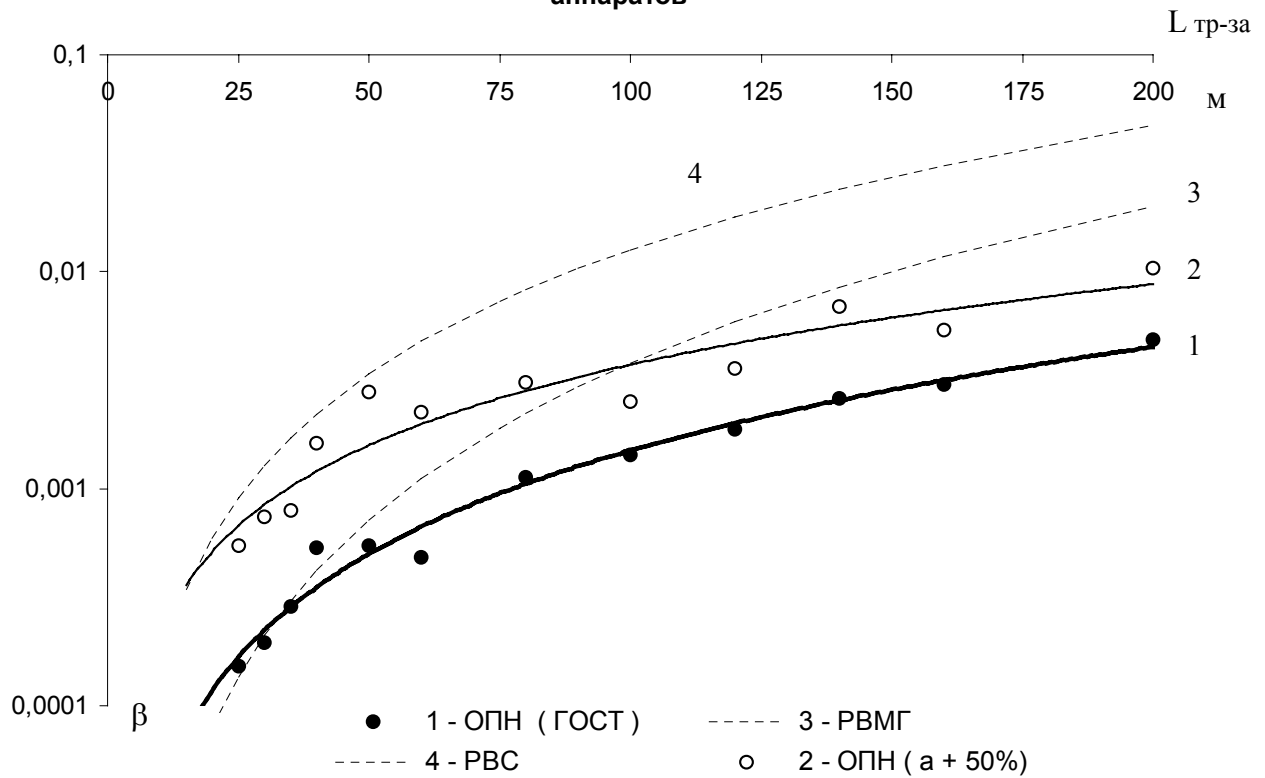
Компенсация ухудшения защитных характеристик разрядников с помощью аппаратных методов возможна при замене РВ на ОПН (рис. 3). Установка ОПН вместо РВ с гостированными характеристиками повышает надежность грозозащиты для подстанций 35 кВ, более чем в 10 раз; 110 кВ - в 5 раз по сравнению с РВС и 1,5-2 раза по сравнению с РВМГ; 220-500 кВ - в 2-3 раза. Использование ОПН позволяет: 1) обеспечить оптимальный технико-экономический показатель грозозащиты подстанций 35-500 кВ для всего ряда допустимых расстояний по ПУЭ; 2) продлить срок службы эксплуатационного оборудования. Проведенные исследования на типовых подстанциях 110 кВ показали, что можно снизить величину воздействующих грозовых перенапряжений на силовом трансформаторе в среднем на 20 %, при этом уровень грозоупорности будет таким же, как и при работе РВ с гостированными характеристиками

Импульсные токи через защитные аппараты, установленные на подстанциях, зависят от типа подстанции, класса напряжения сети, расстояния от защитного аппарата до защищаемого оборудования, места его установки и др. Изучены амплитуды импульсных токов через ОПН 35÷500 кВ. Наиболее вероятные токи для наихудших случаев работы защитных аппаратов приведены в табл.1.

Показатель надежности грозозащиты проходной подстанции 110 кВ по схеме "Четырехугольник". Защитные аппараты: РВМГ-110



Показатель надежности грозозащиты проходной подстанции 110 кВ по схеме "Четырехугольник" при использовании различных защитных аппаратов



Замена устаревших РВ на ОПН на подстанциях осуществляется либо полностью, либо частично. Последнее может привести к работе на подстанции

Таблица 1.

Характеристики импульсных токов через ОПН 35 ÷ 500 кВ  
в зависимости от места их установки

U <sub>ном</sub> , кВ	Импульсный ток через ОПН, кА		
	шины	Трансформаторы	Линии
35	5	5	6
110	5	5	6
220	5	5	6
330	8	8	10
500	10	10	15

двух различных аппаратов. Исследования показали, что при совместной работе ОПН (ГОСТ) и РВ с измененной ВАХ токи через ОПН возрастают в 1,8 - 2,0 раза, а через РВ(ВАХ+20%) уменьшаются в 2 раза.

**В четвертой главе** проведен анализ внутренних перенапряжений, возникающих: -при коммутациях линий 35-500 кВ; -на шинах подстанций 35-500 кВ; -при коммутациях трансформаторов (автотрансформаторов); -при коммутациях шунтирующих реакторов.

Исследование коммутационных токов  $I_k$  через ОПН в сетях 35-500 кВ были проведены для следующих вариантов, которые зависят от конфигурации сети и места установки ОПН: 1) ОПН установлен на линии без силового трансформатора и шунтирующего реактора: а) в конце линии; б) в середине линии; в) в стыке двух линий; 2) ОПН установлен в конце линии параллельно силовому трансформатору или шунтирующему реактору; 3) ОПН установлен между стыком двух линий и при этом параллельно ОПН установлен силовой трансформатор или шунтирующий реактор; 4) ОПН установлен на шинах подстанции, предвключенное сопротивление которой  $X_n$ , и коммутируется одна линия; 5) то же, что и в п.4, но при этом параллельно ОПН установлен силовой трансформатор или шунтирующий реактор.

В качестве примера в таблицах 2 и 3 приведены результаты исследования коммутационных токов  $I_k$ , протекающих через ОПН в сетях 110 и 500 кВ.

Коммутационные токи определялись для коммутаций оперативного отключения и включения линий, отходящих от соответствующих подстанций. Расчеты токов в сетях 110 и 500 кВ проводились при изменении величины предвключенного сопротивления подстанции ( $X_n$ ). Для сетей 110 кВ  $X_n$  изменялось в пределах от 1,9 до 285 Ом, для 500 кВ - от 1,8 до 180 Ом. Длины линий, отходящих от подстанций, оставались неизменными соответственно -

100 и 500 км, а волновые сопротивления линий составляли  $Z_{B110} = 570$  Ом и  $Z_{B500} = 365$  Ом.

Таблица 2.

## Коммутационные токи, протекающие через ОПН в сетях 110 кВ.

№	Отношение индуктивного сопротивления системы к волновому, %	Максимальная амплитуда коммутационных токов, протекающих через ОПН, при его подключении, $I_k$ , кА				
		В конце линии		На шинах п/ст		
		Параллельно сил. Тр-ру	Параллельно Ш.Р.	Сил. тр-ры и Ш.Р. отсутствуют	Параллельно сил. тр-ру	Параллельно Ш.Р.
1	0,3	0,53	0,34	1,80	2,31	2,45
2	1	0,55	0,35	0,78	1,20	1,44
3	5	0,61	0,37	0,30	0,82	0,50
4	10	0,66	0,39	0,23	0,84	0,36
5	25	0,72	0,42	0,17	0,98	0,29
6	50	0,75	0,44	0,15	1,16	0,27

Таблица 3.

## Коммутационные токи, протекающие через ОПН в сетях 500 кВ

№	Отношение индуктивного сопротивления системы к волновому, %	Максимальная амплитуда коммутационных токов, протекающих через ОПН, при его подключении, $I_k$ , кА				
		В конце линии		На шинах п/ст		
		Параллельно сил. тр-ру	Параллельно Ш.Р.	Сил. тр-ры и Ш.Р. отсутствуют	Параллельно сил. тр-ру	Параллельно Ш.Р.
1	0,5	1,62	0,96	7,27	8,80	11,2
2	1	1,62	0,96	4,90	6,07	8,01
3	5	1,69	0,96	1,80	2,38	3,08
4	10	1,75	0,96	1,22	1,66	1,98
5	25	1,80	0,97	0,79	1,16	1,15
6	50	1,87	0,98	0,62	0,98	0,82

С целью определения предельных токов наибольшая кратность коммутационных перенапряжений принята равной 3,5 в сетях 110 кВ. Появление такой кратности возможно при коммутации АПВ со временем бестоковой паузы порядка 0,3 с. В сетях 500 кВ наибольшая кратность принята равной 3.

**В главе пятой** анализируются значения коммутационных токов через ОПН для расчетных (допустимых) кратностей внутренних перенапряжений (таблица 4). Для класса напряжения 35 кВ за расчетную кратность принималась величина  $k_p = 4,3$ ; 110 кВ -  $k_p = 3,1$ ; 220-330 кВ-  $k_p = 2,7$  и 500 кВ -  $k_p = 2,5$ . Коммутационные токи через ОПН, установленный на шинах подстанции, рассчитаны при среднематематических значениях  $\bar{X}_n$ , а также при длинах линий: 50, 100, 150, 250 и 500 км соответственно для классов напряжения 35, 110, 220, 330 и 500 кВ.

Определен срок службы ОПН, установленного в конце линии параллельно силовому трансформатору. Для этого были определены: - статистическое

Таблица 4.

Значения коммутационных токов  $I_k$  через ОПН разных классов напряжения в зависимости от места установки ограничителя

$U_{ном}, \text{кВ}$	Значения коммутационных токов через ОПН $I_k$ (А), зависящие от места установки.		
	Шины подстанции	Линия	
		в середине	в конце
35	225	260	135
110	457	482	250
220	770	710	370
330	1250	1180	620
500	2280	1640	872

распределение амплитуды неограниченных перенапряжений; - статистическое распределение ресурса, расходуемого варисторами ОПН в течение года.

При доверительной вероятности  $P_g = 0,98$  и выдерживаемом коммутационном токе (20 импульсов 1,2/2,5) амплитудой 400 А, срок службы ОПН равен  $N_{сл} = 36$  годам.

В работе рассмотрен также ряд вопросов, касающихся эксплуатации ОПН. Отсутствие финансовых возможностей ряда организаций приводит к тому, что одновременно в сети, например, на подстанции находятся в работе вентильные разрядники и ограничители перенапряжений.

Результаты исследования импульсных токов при грозовых воздействиях показали, что необходимо не допускать смешанного применения защитных аппаратов. Нелинейные ограничители в этом случае могут перегрузиться и повредиться. Во избежание этого, на одних и тех же фазах необходимо использовать однотипные защитные аппараты.

В настоящее время во многих энергосистемах происходит рост рабочего напряжения в нормальном эксплуатационном режиме, что связано со снижением нагрузки в сети. Это может привести к повреждению ОПН, поэтому аппараты необходимо изготавливать на ряд длительных расчетных допустимых напряжений, которые отвечают требованиям МЭК.

**В заключении** приводятся основные научные и практические результаты, полученные в работе.

1. В настоящее время в сетях 35-500 кВ РАО "ЕЭС России" и 35-220 кВ глубокого ввода к промышленным предприятиям находятся в эксплуатации десятки тысяч вентильных разрядников по ГОСТ 16357-83. Анализ защитных характеристик этих аппаратов показал, что после 20-25 лет эксплуатации у вентильных разрядников вольтамперная характеристика

повышается на 15-20 % (в ряде случаев до 30 %), вольтсекундная характеристика изменяется на 20-30 %.

2. Ухудшение электрических характеристик вентиляльных разрядников в несколько раз снижает показатель надежности грозозащиты типовых подстанций 35-500 кВ.
3. Использование РВ с измененной ВАХ во всех случаях не удовлетворяет технико-экономическим показателям грозозащиты типовых подстанций 35-500 кВ.
4. Замена вентиляльных разрядников 35-500 кВ на соответствующие ограничители перенапряжений компенсирует ухудшение защитных характеристик РВ, улучшает показатель надежности грозозащиты в 2 ÷ 3 раза.
5. Исследования показали, что использование ОПН позволяет продлить срок службы эксплуатационного оборудования.
6. Результаты исследований импульсных токов при грозовых воздействиях показали, что необходимо не допускать смешанного применения защитных аппаратов. Импульсные токи через ОПН увеличиваются приблизительно в два раза.
7. Прогнозированы импульсные и коммутационные токи через ограничители перенапряжений 35-500 кВ в зависимости от мощности питающего источника и места подключения этих защитных аппаратов.
8. Разработаны технические требования к ограничителям перенапряжений 35-500 кВ. Определен срок службы ОПН. Даны рекомендации, направленные на улучшение условий работы ОПН, и предотвращение ошибок работников энергосистем и промышленных предприятий при их эксплуатации

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. Иманов Г.М., Колычев А.В., Корень М.Г., Розет В.Е., Халилов Ф.Х. Необходимость замены вентиляльных разрядников 110 кВ и выше на нелинейные ограничители перенапряжений./ Эксплуатация, качество и надежность вентиляльных разрядников и серийно изготавливаемых ОПН 110 кВ и выше. Сборник материалов совещания.– СПб.: ПЭИПК, 1997 г.
2. Гумерова Н.И., Колычев А.В., Халилов Ф.Х. Некоторые аспекты размещения и эксплуатации ограничителей перенапряжений средних классов напряжений./ Эксплуатация, производство и обеспечение качества защитных аппаратов в классе 0,5 ÷ 35 кВ. Сборник материалов совещания.– СПб.: ПЭИПК, 1997 г.
3. Колычев А.В., Халилов Ф.Х., Шилина Н.А. Результаты исследования влияния изменения характеристик вентиляльных разрядников на показатель надежности грозозащиты от перенапряжений./ Сборник докладов V Российской научно-

технической конференции "Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов ЭМС-98", С.Петербург,1998г

4. Колычев А.В., Халилов Ф.Х. Необходимость защиты от перенапряжений силовых фильтров и батарей статических конденсаторов./ Информбюллетень № 9 Регионального спец. Совета по диагностике электрооборудования при Уралэнерго,2-3.09.98

5. Колычев А.В., Розет В.Е., Халилов Ф.Х. Характеристики ОПН для защиты батарей статических конденсаторов./ Информбюллетень № 9 Регионального спец. Совета по диагностике электрооборудования при Уралэнерго,2-3.09.98

6. Колычев А.В., Халилов Ф.Х., Шилина Н.А. Необходимость защиты сетей напряжением до 1 кВ от перенапряжений./ Электротехника и электроэнергетика.Проблемы управления электроэнергетическими системами. Труды СПбГТУ, № 471, 1998 г