

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 621.316.1.015.3

**Кротенок
Владимир Владимирович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГРАНИЧЕНИЯ
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ
ПРИ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ**

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.02 – Электростанции
и электроэнергетические системы**

Минск, 2010

Работа выполнена в учреждении образования «Гомельский
государственный технический университет имени П.О. Сухого»

Научный руководитель –

Бохан Александр Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Электроснабжение», Учреждение
образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого»

Официальные оппоненты:

Русан Викентий Иванович,
доктор технических наук, профессор, про-
фессор кафедры «Практическая подготовка
студентов», учреждение образования «Бело-
русский государственный аграрно-
технический университет»;

Красько Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Электрические станции», Белору-
сский национальный технический университет

Оппонирующая организация – Научно-исследовательское и проектное
республиканское унитарное предприятие
«БелТЭИ» (г. Минск)

Защита состоится 18 июня 2010 года в 10:00 на заседании Совета по за-
щите диссертаций Д 02.05.02 при Белорусском национальном техническом
университете по адресу: г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 2,
ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
Белорусского национального технического университета.

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах просим высы-
лать по адресу университета и предварительно отправлять по факсу (8-017)-
292-91-37 (для стран СНГ: (8-10-375-17)-292-91-37) на имя председателя Сове-
та по защите диссертаций Ф.А. Романюка.

Автореферат разослан « 14 » 05 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, доцент

_____ И.И Сергей
©Кротенок В.В., 2010
©БНТУ, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Сети 6–35 кВ относятся к распределительным сетям и являются наиболее протяженными среди сетей высокого напряжения. Эксплуатационные качества электрических сетей, способы локализации аварийных повреждений и условия бесперебойного электроснабжения потребителей, в значительной мере определяются режимом заземления нейтрали. Большинство всех аварийных повреждений в электрических сетях 6–35 кВ связаны с однофазными замыканиями на землю (ОЗЗ). Причины возникновения ОЗЗ в воздушных и кабельных сетях весьма многообразны. Это электрические и механические разрушения изоляции, обрыв проводов и тросов, разрывы токоведущих частей и фаз кабелей в соединительных муфтах при смещениях почвы, воздействие грозových и внутренних перенапряжений.

На развитие аварийных ситуаций, связанных с замыканиями на землю, оказывают влияние многочисленные факторы: способ заземления нейтрали; уровень изоляции электрооборудования; аппараты защиты от грозových и коммутационных перенапряжений; сопротивление контура заземления подстанции; безопасность персонала и электрооборудования при однофазных замыканиях и др.

Повышение надежности работы распределительных сетей напряжением 6–35 кВ может быть достигнуто снижением уровней внутренних перенапряжений. Эффективное решение таких задач может быть найдено для каждой конкретной сети индивидуально с учетом характерных ее особенностей. Снижение внутренних перенапряжений при ОЗЗ возможно за счет оптимизации параметров ограничителей перенапряжений (ОПН) и мест их установки. Разработка совершенных математических моделей ОПН и распределительной сети для исследования перенапряжений позволяет с минимальными затратами и качественно решать поставленные задачи.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Работа выполнялась в соответствии с научной программой Министерства образования Республики Беларусь по теме «Повышение эффективности средств снижения внутренних перенапряжений в распределительных сетях с целью повышения надежности электроснабжения» № Гос. регистрации 20090446, инв. № 26/09.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является снижение уровней перенапряжений в распределительных сетях при однофазных дуговых замыканиях на землю.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие основные задачи:

- разработать экспериментальную установку для испытания ОПН напряжением промышленной частоты и высокой частоты, с целью определения напряжения ограничения и динамических характеристик ОПН;
- с учетом результатов эксперимента, составить модель распределительной сети, и модель ОПН для исследования внутренних перенапряжений при однофазных замыканиях на землю;
- исследовать уровни перенапряжений в сети с различными режимами заземления нейтрали при дуговых замыканиях на землю, определить максимальные уровни перенапряжений в зависимости от эквивалентной емкости сети, активной проводимости фаз на землю, параметров заземляющих резисторов, места установки и параметров ОПН;
- разработать и исследовать устройство глубокого ограничения перенапряжений в распределительной сети.

Объектом исследования являются: средства ограничения перенапряжений в электрических сетях и системах.

Предмет исследования – методы и технические средства ограничения перенапряжений в распределительных сетях среднего напряжения (6–35 кВ) при дуговых замыканиях на землю, с применением ограничителей перенапряжений нелинейных.

Положения, выносимые на защиту

- Алгоритмы и структура математической модели ОПН для исследования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю, учитывающая динамические свойства ОПН, в состав которой входит апериодическое звено первого порядка с постоянной времени 120–160 мкс.
- Имитационная модель распределительной сети с ОПН для исследования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю, позволяющая на 10–20 % повысить точность результатов моделирования за счет более полного учета свойств ОПН.
- Экспериментальная установка для исследования характеристик и свойств ОПН при комбинированном воздействии на него испытательного напряжения промышленной частоты и высокочастотной составляющей

напряжения, позволяющая выполнять сравнительный анализ и диагностику ОПН.

- Устройство глубокого ограничения перенапряжений в распределительной сети, основными элементами которого являются последовательно соединенные симистор и варистор с пониженным уровнем ограничения, позволяющее уменьшить ресурс расходования изоляции в сети и уменьшить тепловыделение в варисторе в установившихся режимах.

Личный вклад соискателя

Диссертационное исследование является результатом научно-исследовательских работ по повышению эффективности средств ограничения перенапряжений в распределительных сетях при дуговых замыканиях на землю, выполненных на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П.О. Сухого при участии автора. Автором разработана структура математической модели ОПН, блок коррекции теплофизических параметров, предложена аппроксимация статической характеристики ОПН и способ изменения сопротивления варистора управляемого током. На основе результатов экспериментальных исследований разработан метод определения постоянной времени апериодического звена первого порядка, входящего в состав модели. Предложен алгоритм и структура имитационной модели распределительной сети для исследования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю. На разработанной модели определены значения максимальных перенапряжений в распределительной сети с ОПН при дуговых замыканиях на землю. Автору принадлежит разработка и отладка блока цифровой обработки результатов измерений на экспериментальной установке. Выполнено исследование работы устройства глубокого ограничения перенапряжений при установке его на шинах и в нейтрали сети. Автором исследованы тепловые режимы варистора, входящего в устройство глубокого ограничения перенапряжений, при перемежающейся дуге.

Апробация результатов диссертации

Основное содержание, теоретические положения, выводы и рекомендации диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение:

- на международной научно-технической конференции «Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования» (г. Минск, 2004 г.);
- международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов (г. Гомель, 2001, 2002, 2003 г.);

- международной научно-технической конференции «Энергосбережение, электроснабжение, автоматизация» (г. Гомель, 2001 г.);
- международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, 2004 г.);
- молодежной научно-технической конференции вузов приграничных регионов славянских государств (г. Брянск, 2002 г.);
- международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование» (г. Могилев, 2003 г.);
- международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (г. Гомель, 28–29 апр. 2008 г.);
- международной научно-технической конференции «Металл-2008» (г. Жлобин, БМЗ, 2008 г.);
- международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, БНТУ, 2008 г.).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах, из них 4 статьи в научных журналах (одна статья в журнале «Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ)», три статьи в журнале «Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого»), что составляет 1,3 авторских листа. Также опубликовано 13 статей в сборниках международных и республиканских конференций. Выдан один действующий патент на изобретение № 8922. Всего опубликовано 65 страниц материалов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 149 страниц текста, из которых 3 страницы заняты таблицами, 46 – рисунками, 11 страниц – списком использованных источников (103 наименований) и 30 страниц – приложениями.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрен анализ современного состояния вопросов, выбора методов и технических средств ограничения внутренних перенапряжений в распределительных сетях.

Отмечено, что распределительные электрические сети напряжением 6–35 кВ являются наиболее протяженными, подавляющее большинство нарушений нормальной работы этих сетей связаны с повреждением изоляции относительно земли – с однофазным дуговым замыканием (ОДЗ) на землю (до 80 % в кабельных сетях). Поэтому борьба с ними является важнейшим направлением повышения надежности систем электроснабжения.

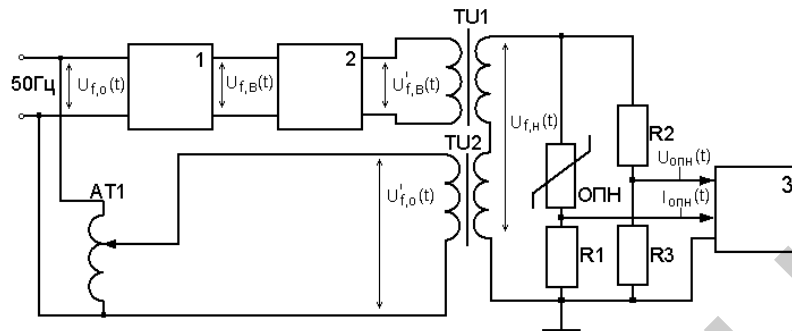
Распределительные сети, в зависимости от параметров сети, могут иметь изолированную, резонансно заземленную, резистивно заземленную нейтраль либо смешанные их варианты. Перенапряжения, возникающие при ОДЗ, могут быть опасны для изоляции электрооборудования. В сети с изолированной нейтралью, дуговые перенапряжения могут превышать в 4,5 раза амплитуду фазного напряжения. Для сети с резонансно заземленной нейтралью, кратность перенапряжений может достигать $3,5U_{\phi}$. Применение резистивно заземленной нейтрали, позволяет ограничивать дуговые перенапряжения до $2,6U_{\phi}$.

Необходимо отметить, что при моделировании ОПН статической вольт-амперной характеристикой, результаты вычислительного эксперимента дают заниженные уровни перенапряжений при замыканиях на землю в распределительной сети, по сравнению с экспериментальными исследованиями. Сравнительный анализ результатов моделирования и эксперимента показывает, что уровни перенапряжений в экспериментальных исследованиях на 10–20 % выше, чем при моделировании. В известных расчетных исследованиях, остающееся напряжение на ОПН определяется амплитудой разрядного тока и не зависит от частоты свободной составляющей переходного процесса. Это позволяет сделать вывод, что моделирование ОПН статической вольт-амперной характеристикой (ВАХ), не отражает в достаточной мере свойства ОПН, и снижает точность результатов вычислительного эксперимента.

Установлено, что снижение перенапряжений в распределительных сетях остается актуальной задачей. Для анализа и решения происходящих процессов при ОДЗ в распределительных сетях, и оптимизации средств ограничения перенапряжений, при различных условиях работы сети, можно применить их компьютерное моделирование. Применение компьютерного моделирования позволит выполнять большое количество вычислительных экспериментов при низких материальных затратах.

Во второй главе описана экспериментальная установка для исследования характеристик ОПН при воздействии испытательного напряжения разной частоты. Для оценки влияния ОПН на снижение перенапряжений при дуговых замыканиях на землю, выполнено экспериментальное исследование вольт-амперной характеристики, в том числе и при воздействии напряжения повышенной частоты.

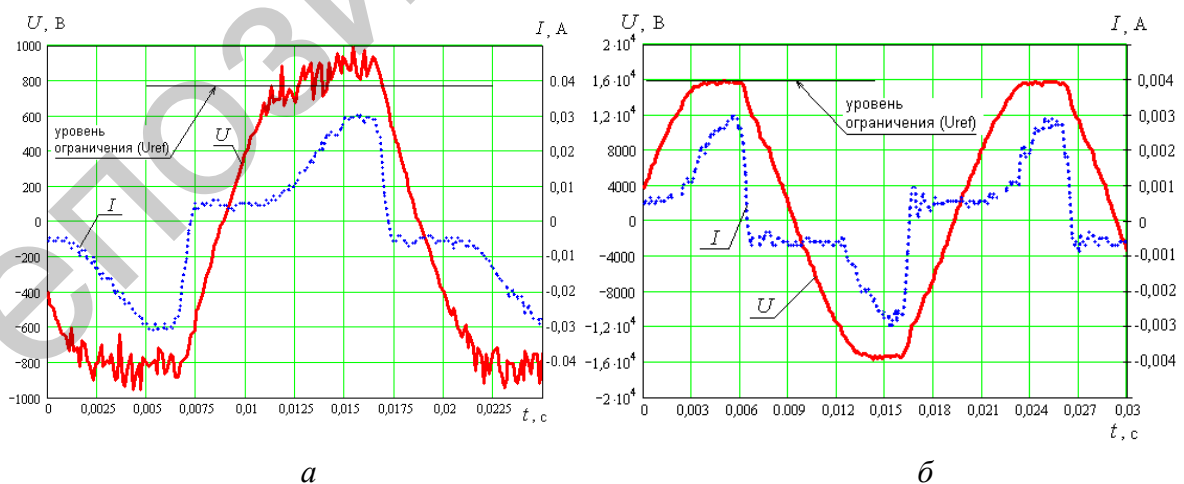
Функциональная схема испытательной установки приведена на рисунке 1. При испытании варисторов 0,4; 6; 10 кВ, в установке применялись трансформаторы напряжения (TU1, TU2) НОМ–6 или НОМ 10.



$U_{f,o}(t)$ – напряжение сети питающей установку; $U'_{f,o}(t)$ – напряжение основной частоты, с учетом коэффициента трансформации $K_{АТ1}$ автотрансформатора АТ1; $U_{f,B}(t)$ – напряжение высокой частоты; $U'_{f,B}(t)$ – напряжение после полосового фильтра; $U_{f,н}(t)$ – напряжение подаваемое на варистор (испытательное напряжение) 1 – инвертор; 2 – полосовой фильтр; TU1, TU2 – трансформаторы напряжения НОМ-6, 3 – регистратор

Рисунок 1 – Функциональная схема установки для испытаний ОПН

Исследованы динамические характеристики ОПН разного класса напряжения, ОПН–Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2, ОПН–КР/TEL 10/10,5 УХЛ1 и др. На ОПН подавалось напряжение промышленной частоты (50 Гц). В результате было определено напряжение срабатывания (U_{ref}) и ток ($I_{ref}=1\text{мА}$) при котором ОПН переходил в проводящее состояние (уровень ограничения, рисунок 2).

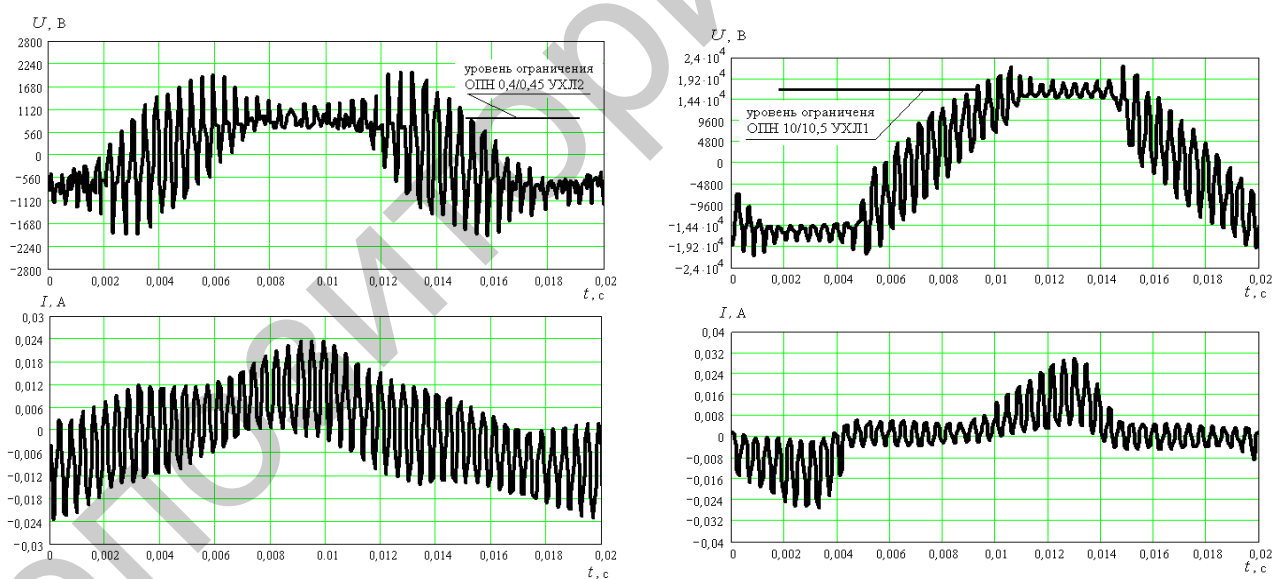


а – ОПН 0,4/0,45 УХЛ2; *б* – ОПН 10/10,5 УХЛ1

Рисунок 2 – Осциллограммы тока и напряжения ОПН при испытании напряжением промышленной частоты

При воздействии на ОПН испытательным напряжением, состоящим из высокочастотной составляющей (2,4 кГц) наложенной на напряжение промышленной частоты, были получены осциллограммы (рисунок 3). Анализ результатов эксперимента дает основание предположить, что при высокой скорости изменения напряжения, ОПН не успевает реагировать на высокочастотные составляющие перенапряжения заданной амплитуды. При работе ОПН в указанных зонах варистор не успевает перейти в проводящее состояние, из-за инерционности ориентирования доменов структуры варистора. Это позволяет предположить, что при воздействии на ОПН напряжений, превышающих уровень ограничения, переход варисторов в проводящее состояние происходит с замедленной реакцией.

В данной главе также приведен статистический анализ полученных экспериментальных данных. Статистический анализ характеристик ОПН, при воздействии на него испытательным напряжением промышленной частоты, показал, что коэффициент корреляции в данном случае принимает значение 0,99. Для экспериментальных исследований при суммарном воздействии напряжений промышленной частоты и высокочастотной составляющей 2,4 кГц, коэффициент корреляции составил 0,96.



a

б

a – ОПН 0,4/0,45 УХЛ2; *б* – ОПН 10/10,5 УХЛ1

Рисунок 3 – Осциллограммы тока и напряжения ОПН, испытательное напряжение состоит из высокочастотной составляющей (2,4 кГц), наложенной на напряжение промышленной частоты

В третьей главе приведено описание разработки, имитационной модели распределительной сети и ОПН. Определены понятия и требования, предъявляемые к математическим моделям электротехнических объектов.

Исследования динамических характеристик ОПН показали, что в его модели необходимо учитывать следующее: инерционность работы (замедленная реакция ОПН на перенапряжение); тепловое действие тока; физическое разрушение. Показана структурная схема модели ОПН, которая была реализована в системе Matlab. Структурная схема имитационной модели ОПН представлена на рисунке 4.

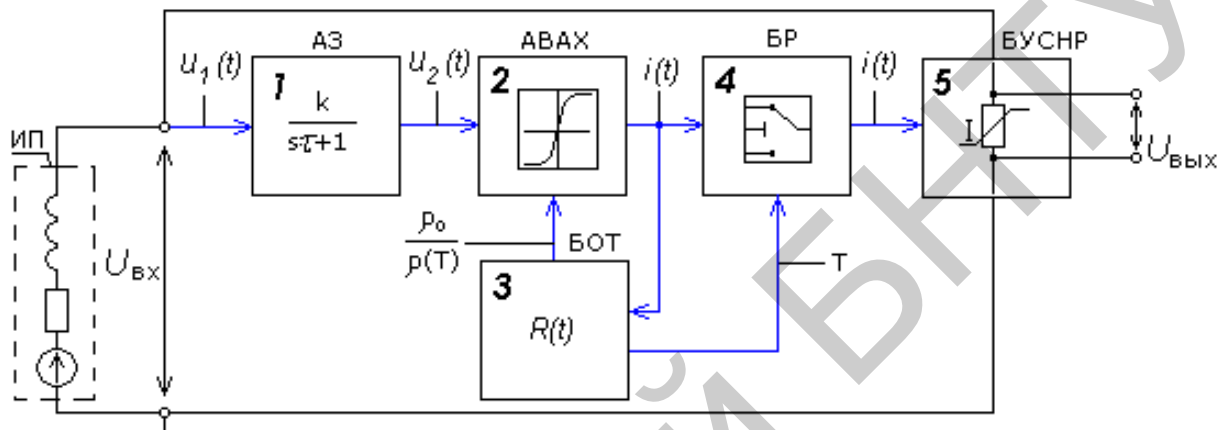


Рисунок 4 – Структурная схема модели ОПН

Блок 1 (АЗ), аperiodическое звено, реализует инерционность работы. Блок 2 (АВАХ), аппроксимация статической ВАХ ОПН. Блок 3 (БОТ) – блок определения температуры ОПН, определяет, и по обратной связи корректирует изменение ВАХ ОПН с учетом расчетных температур, определяющих изменение удельной проводимости варистора. Блок 4 (БР), блок разрушения, моделирует разрушение ОПН, по критерию достижения ОПН температуры, критического уровня T . Блок 5 (БУСНР), блок управления сопротивлением резистора, изменяет сопротивление резистора, посредством управляющего сигнала тока. Блок ИП, является источником напряжения ($U_{ВХ}$) заданной частоты и амплитуды, со своим внутренним сопротивлением.

Применение в модели ОПН аperiodического звена первого порядка, позволяет учитывать замедленную реакцию ОПН на перенапряжения. Для определения постоянной времени запаздывания срабатывания, были выполнены экспериментальные исследования ОПН–Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2, при воздействии на него напряжением 3 кВ с частотой сигнала 3,3 кГц. На рисунке 5, приведена фотография осциллограммы напряжения на ОПН–Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2, из которой видно, что время задержки включения ОПН в проводящее состояние равно t_3 .

Анализируя приведенную осциллограмму (рисунок 5), можно сделать заключение, что на протяжении времени t_3 , мгновенное значение напряжения превышает уровень срабатывания (U_{ref}), но фактическое ограничение напря-

жения на ОПН происходит на небольшом отрезке. Это может быть объяснено замедленной реакцией ОПН на перенапряжение (инерционность работы).

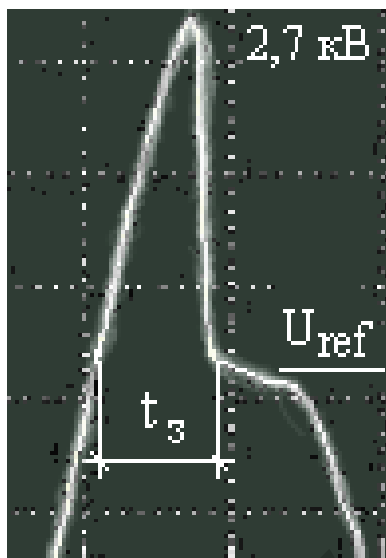


Рисунок 5 – Фотография осциллограммы напряжения на ОПН–Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2, амплитуда сигнала 2,7 кВ, $U_{ref} = 760$ В, частота 3,3 кГц

Для исследуемых варисторов, ОПН–10 и ОПН–0,4, определена постоянная времени апериодического звена первого порядка, которая составила ≈ 120 – 160 мкс. Определить постоянную времени апериодического звена τ можно решая уравнение (1):

$$t_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \omega} \cdot \left(\arccos\left(\frac{U_{ref}}{U_m}\right) - \arccos\left(\frac{U_{ref} \cdot \sqrt{1 + \tau^2 \omega^2}}{U_m}\right) + \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{1 + \tau^2 \omega^2}}\right) \right), \quad (1)$$

где ω – угловая частота исследуемого сигнала, c^{-1} ;

U_m – амплитуда напряжения которое ОПН не «срезал», В;

U_{ref} – уровень ограничения напряжения, В;

t_3 – время задержки включения ОПН в проводящее состояние, с;

τ – постоянная времени апериодического звена первого порядка, с.

В данной главе также приведены исследования тепловых режимов ОПН. Выполненные исследования позволили учесть температурные изменения параметров варистора в разработанной модели ОПН.

Математическую модель ОПН можно представить в виде (2):

$$u(i, T) = \begin{cases} k_1 \cdot \left(\frac{i}{I_{ref}} \right)^{\alpha_1} \cdot U_{ref} \cdot \frac{\rho_0}{\rho(T)}, & \text{если } 0 \leq |i| < i_{c1} \\ k_2 \cdot \left(\frac{i}{I_{ref}} \right)^{\alpha_2} \cdot U_{ref} \cdot \frac{\rho_0}{\rho(T)}, & \text{если } i_{c1} \leq |i| < i_{c2}, \\ k_3 \cdot \left(\frac{i}{I_{ref}} \right)^{\alpha_3} \cdot U_{ref} \cdot \frac{\rho_0}{\rho(T)}, & \text{если } i_{c2} \leq |i| < i_{c3} \\ i \cdot R(T), & \text{если } T \geq 1000 \end{cases} \quad (2)$$

где $k_1, k_2, k_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, – коэффициенты, зависящие от типа варистора, определяются экспериментально, о.е.;

$\frac{\rho_0}{\rho(T)}$ – коэффициент, учитывающий изменение удельного сопротивления

от температуры, о.е.;

i и u – мгновенные значения тока, А и напряжения, В;

U_{ref} – пороговое значение напряжения, В;

I_{ref} – величина тока устройства при значении напряжения равном пороговому, А;

T – температура ОПН, К;

i_{c1}, i_{c2}, i_{c3} , – пределы значения токов для определения нелинейных участков значения функции $u(i, T)$, А;

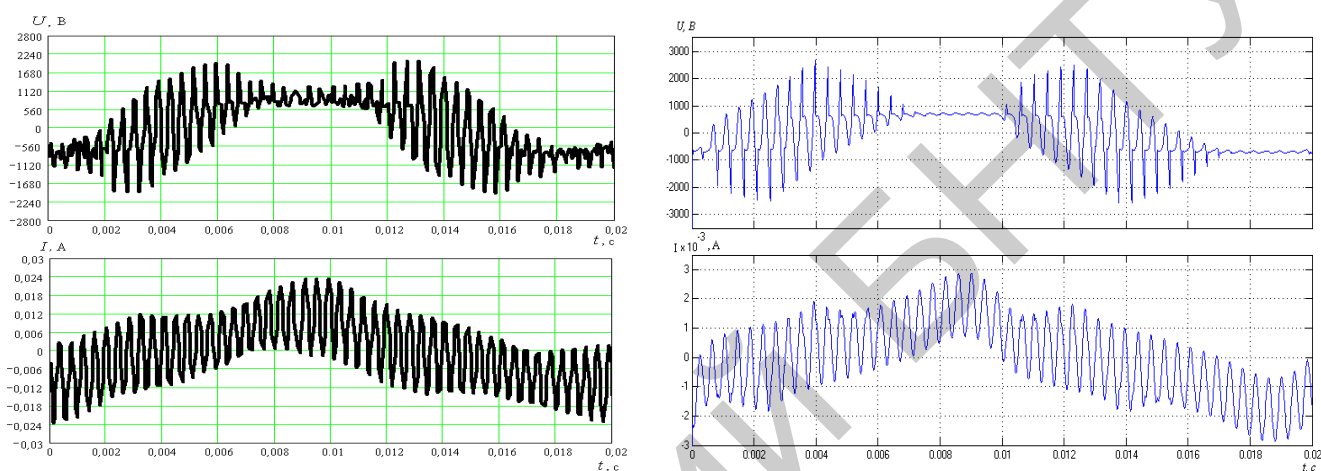
R – сопротивление ОПН после разрушения (≈ 10 Мом), Ом.

Выполнены исследования работы ОПН при комбинированном воздействии напряжения промышленной частоты и высокочастотной составляющей напряжения. Полученные результаты вычислительного эксперимента на разработанной модели ОПН, сопоставимы с результатами испытаний ОПН на экспериментальной установке. На рисунке 6, а – представлены экспериментальные осциллограммы напряжения и тока ОПН–Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2. Испытательное напряжение состоит из высокочастотной составляющей (2,4 кГц) наложенной на напряжение промышленной частоты. Амплитуда основной гармоники равна началу срабатывания ОПН (0,95 кВ), значение амплитуды высокочастотной составляющей – 1,25 кВ. На рисунке 6, б – показаны расчетные осциллограммы напряжения и тока ОПН–Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2, при тех же параметрах испытательного напряжения на ОПН.

Их анализ позволяет сделать вывод, что форма напряжения и тока ОПН, при одних и тех же условиях подачи испытательного напряжения, практически совпадают. Напряжение и ток ОПН, которые получены расчетным путем, повторяют динамику, характер поведения кривых тока и напряжения экспериментальных данных. Коэффициент корреляции, для экспериментальных и

расчетных данных составил 0,94. Это свидетельствует о высокой достоверности динамической модели ОПН.

Разработанная имитационная модель распределительной сети с ОПН, позволяет с высокой достоверностью моделировать переходные процессы в распределительных сетях, тем самым производить оценку возникающих перенапряжений, оценивать влияние режима заземления нейтрали, параметров сети и ограничителей перенапряжений на характер переходного процесса.



a – осциллограммы, полученные при эксперименте, *б* – осциллограммы, полученные расчетным путем

Рисунок 6 – Осциллограммы напряжения и тока, при испытании ОПН–Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2 напряжением промышленной частоты сложенной с напряжением частотой 2,4 кГц

В четвертой главе приведены результаты исследований перенапряжений при моделировании переходных процессов в распределительной сети. При моделировании однофазных дуговых замыканий в распределительных сетях, было выяснено, что значительные перенапряжения могут возникать в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью. Величина перенапряжений может зависеть от интенсивности ОДЗ (однократные или перемежающаяся дуга), длины линий, степени раскомпенсации дугогасящего реактора (ДГР), а так же величины активной проводимости фаз. Максимальные кратности перенапряжений в неповрежденных фазах достигают $4,5-4,8U_{\phi}$ для изолированной нейтрали. В сети с компенсированной нейтралью, при расстройке ДГР и появлении ОДЗ, возникают «биения» напряжений, сопровождающиеся перенапряжениями до $2U_{\phi}$.

Расчетные осциллограммы при многократных однофазных замыканиях на землю фазы А в сети с изолированной нейтралью, приведены на рисунке 7.

Необходимо отметить, что для подтверждения адекватности разработанной динамической модели ОПН, проведены расчеты на модели, при условиях соответствующих экспериментальным исследованиям. Корреляция экспериментальных и расчетных данных составила 0,95, что позволяет судить о высокой достоверности разработанной математической модели ОПН.

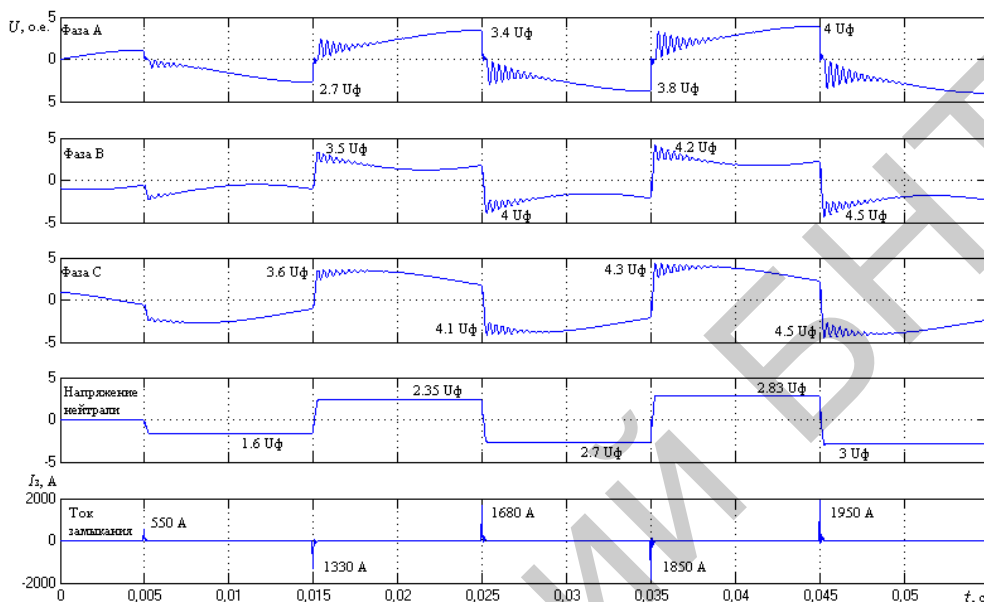


Рисунок 7 – Расчетные осциллограммы при однофазном замыкании на землю фазы А в сети с незаземленной нейтралью, при повторных загораниях дуги через полпериода промышленной частоты $C_{экв} = 1,38$ мкФ)

Эффективным средством снижения перенапряжений при ОДЗ является резистивное заземление нейтрали. При этом уменьшается вероятность появления повторных замыканий в распределительной сети. Результаты моделирования переходных процессов в распределительной сети при резистивном заземлении нейтрали показывают, что дуговые перенапряжения не превышают $2,5U_{\phi}$.

Исследовано влияние активной проводимости фаз на землю на уровни перенапряжений при ОДЗ. Результаты моделирования показали, что увеличение активной проводимости фаз может приводить к снижению перенапряжений на 7 %.

Результаты вычислительного эксперимента показали, что подключение ОПН в нейтраль сети, позволяет снизить перенапряжения, возникающие при ОДЗ, в 1,3 раза по сравнению с перенапряжениями сети с изолированной нейтралью. Установка в нейтраль ОПН имеет следующие преимущества: в нормальном режиме на ОПН отсутствует напряжение, и сохраняются свойства изолированной нейтрали сети; выбор ОПН может осуществляться по фазному

напряжению с учетом допустимых перенапряжений; ОПН установленный в нейтрали будет срабатывать при замыкании на землю любой из фаз сети.

На рисунке 8 показан процесс однофазного замыкания в сети 6 кВ с заземлением нейтрали через ОПН.

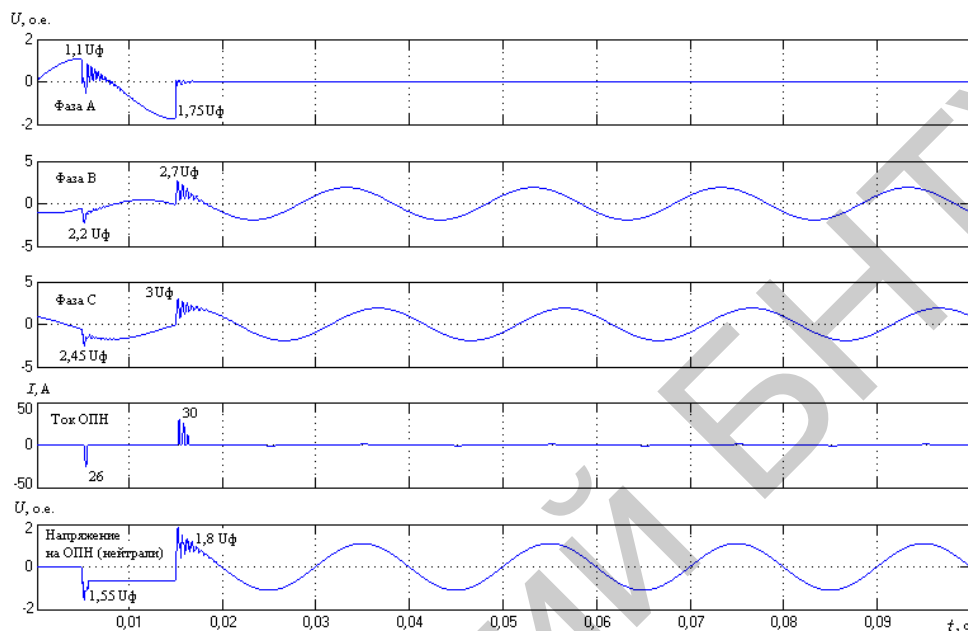
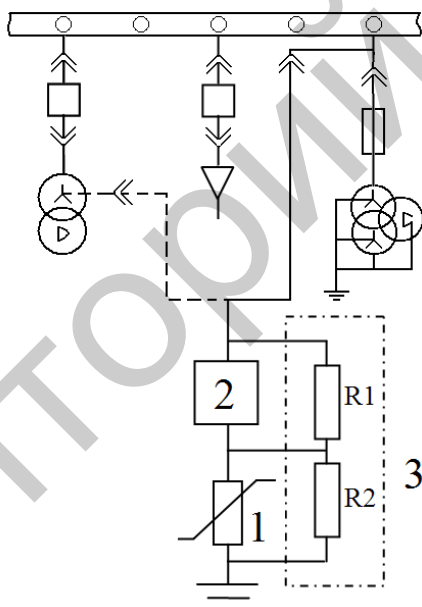


Рисунок 8 – Процесс однофазного замыкания в сети 6 кВ с заземлением нейтрали через ОПН–3/4,2 КС/TEL. Емкостной ток замыкания на землю 2,33 А

В пятой главе представлены результаты вычислительного эксперимента моделирования однофазных замыканий на землю в распределительной сети, с использованием разработанного устройства глубокого ограничения перенапряжений. Применение устройства глубокого ограничения перенапряжений, позволяет снизить уровни перенапряжений в распределительных сетях с изолированной или компенсированной нейтралью. На рисунке 9 представлена функциональная схема предлагаемого устройства глубокого ограничения перенапряжений в распределительной сети.

Устройство работает следующим образом. В нормальном режиме в цепи симистора и последовательно соединенного с ним ОПН, ток отсутствует, т.к. симистор закрыт и напряжение, приложенное к нему меньше напряжения включения при отсутствии управляющего тока. Делитель напряжения, распределяет поданное на симистор напряжение, уровень которого ниже порога его срабатывания. При замыкании на землю в электрической сети, вследствие переходного процесса, на неповрежденных фазах возникают перенапряжения. В начальный момент переходного процесса, когда волна перенапряжения превышает исходный защитный уровень устройства, происходит открытие сими-

стора. Падение напряжения на нем становится близким к нулю, а снижение исходного защитного уровня ограничителя перенапряжений приводит к его срабатыванию. Это значит, что все напряжение прикладывается к ОПН с пониженным уровнем ограничения. Пониженный уровень ограничения перенапряжений сохраняется до тех пор, пока мгновенное значение тока в цепи ОПН не перейдет через ноль и симистор автоматически закроется. Последующее включение симистора произойдет только лишь тогда, когда уровень перенапряжений вследствие переходного процесса превысит установленное значение. При установившемся замыкании на землю, что характерно для металлического замыкания, напряжение на неповрежденных фазах увеличивается до линейного значения, а перенапряжение, связанное с переходным процессом отсутствует. В этих условиях симистор находится в закрытом состоянии, и ток через ОПН не протекает. Такой режим не может привести к повреждению ОПН, и работа в этом режиме может продолжаться неограниченно долго.



1 – ОПН с пониженным уровнем ограничения; 2 – симистор; 3 – делитель напряжения

Рисунок 9 – Функциональная схема устройства глубокого ограничения перенапряжений, и возможные схемы его подключения

В главе представлены исследования тепловых режимов ОПН, входящего в состав устройства глубокого ограничения перенапряжений. Полученные зависимости позволяют определить допустимую длительность работы ОПН при дуговых замыканиях на землю.

Проведена оценка расхода ресурса изоляции при воздействии импульсов перенапряжений, в сетях с различными режимами заземления, которая выполнялась по выражению (3):

$$B = \frac{U_{\text{пр}2}}{U_{\text{пр}1}} = \sqrt[n]{\frac{t_{\text{в}1}k_{n1}}{t_{\text{в}2}k_{n2}}}, \quad (3)$$

где B – относительный ресурс изоляции сети, приведенный к сети с низкоомным заземлением;

$U_{\text{пр}1}, U_{\text{пр}2}$ – пробивное напряжение изоляции для исследуемых сетей, В;

$n = 6-12$ – показатель степени, зависящий от типа изоляционной конструкции.

Применение предложенного устройства, позволяет снизить уровни перенапряжений в сети по сравнению с установкой ОПН обычной конструкции, при этом возможное расходование ресурса изоляции может уменьшиться на 5,5 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации выполнены экспериментальные и вычислительные исследования, направленные на снижение перенапряжений в распределительных сетях 6–35 кВ при дуговых замыканиях на землю.

Основные научные результаты диссертации

- Разработана математическая модель ОПН, учитывающая динамические свойства ОПН и изменение теплофизических свойств варистора в процессе нагрева. Получены математические выражения позволяющие определить постоянную времени апериодического звена первого порядка, входящего в состав модели ОПН. Для исследуемых типов ОПН постоянная времени апериодического звена находилась в диапазоне 120–160 мкс. При этом результаты моделирования с высокой степенью достоверности соответствуют экспериментальным исследованиям, а коэффициент корреляции составляет 0,94 [2], [3], [10].

- Разработана имитационная модель распределительной сети с ОПН, которая позволяет повысить точность результатов моделирования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю за счет более полного учета свойств ОПН. Предложенная модель позволяет исследовать перенапряжения при различных режимах заземления нейтрали и изменении параметров сети, а также выполнять оптимизацию параметров ограничителей перенапряжений и мест их установки [4], [12], [16].

- Разработана экспериментальная установка, позволяющая выполнять исследования характеристик и свойств ОПН при воздействии напряжения промышленной частоты и высокочастотной составляющей напряжения, что позволяет воспроизводить режимы работы ОПН близкие к условиям эксплуатации при дуговых замыканиях на землю. Установка может быть использова-

на для диагностики и сравнительного анализа ОПН различных типов и фирм [2], [3], [6], [7].

- Выполнены расчетные исследования уровней перенапряжений в сети с различными режимами заземления нейтрали при дуговых замыканиях на землю, которые подтвердили высокую степень соответствия результатов моделирования экспериментальным исследованиям. Определены максимальные уровни перенапряжений в зависимости от эквивалентной емкости сети, активной проводимости фаз на землю, параметров заземляющих резисторов, места установки и параметров ОПН. Максимальные кратности перенапряжений при перемежающейся дуге могут достигать $4,5-4,8U_{\phi}$. Учет динамических свойств ОПН при моделировании дуговых замыканий на землю приводит к увеличению расчетных перенапряжений на 10–20 %, что соответствует известным экспериментальным исследованиям [3], [4], [5], [8], [16].

- Разработанное устройство глубокого ограничения перенапряжений в электросети, позволяет снизить максимальные уровни перенапряжений на 20–30% по сравнению с установкой ОПН обычной конструкции. Устройство выполненное по предложенной конструктивной схеме может подключаться как на шины распределительной сети, так и в нейтраль [1], [17].

- Исследованы тепловые режимы ОПН, входящего в состав устройства глубокого ограничения перенапряжений. Полученные зависимости позволяют определить допустимую длительность работы ОПН при дуговых замыканиях на землю [2], [3].

Рекомендации по практическому использованию результатов

- Разработанная модель распределительной сети и модель ОПН, может быть использована для исследования и оптимизации средств ограничения перенапряжений в распределительных сетях при однофазных замыканиях на землю.

- Практическое использование разработанной экспериментальной установки позволяет воспроизводить режимы работы ОПН близкие к условиям эксплуатации при дуговых замыканиях на землю. Это позволяет проводить сравнительный анализ и диагностику ОПН различных фирм и типов.

- Разработанное устройство глубокого ограничения перенапряжений можно рекомендовать для включения в нейтраль сети. Это позволяет обеспечить более глубокое снижение уровней перенапряжений при меньших затратах.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи

1. Кротенок, В.В. Разработка устройства глубокого ограничения в электросети / В.В. Кротенок // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2009. – № 1. – С.51–67.
2. Бохан, А.Н. Динамическая модель ОПН для исследования внутренних перенапряжений в распределительных сетях / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2006. – №1. – С. 58–70.
3. Бохан, А.Н. Применение ОПН для защиты от внутренних перенапряжений в сетях 6–10 кВ / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 5. – С.39–46.
4. Бохан, А.Н. Снижение перенапряжений при дуговых замыканиях на землю / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2004. – № 1. – С.46–51.

Материалы конференций

5. Бохан, А.Н. Особенности моделирования перенапряжений в сетях с ОПН / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок, С.Н. Прохоренко // Наука и производство – 2009 : сборник материалов Международной научно-практической конференции, г. Брянск, 19–20 марта 2009.
6. Бохан, А.Н. Исследование и анализ динамических характеристик ОПН 6–10 кВ / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок, С.Н. Прохоренко // Наука – образованию, производству, экономике : сборник тезисов шестой Международной научно-технической конференции БНТУ, г. Минск, 2008.
7. Бохан, А.Н. Определение остающегося напряжения на ОПН при дуговых замыканиях на землю в сетях среднего напряжения / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок, С.Н. Прохоренко // Наука – образованию, производству, экономике : Сборник тезисов шестой международной научно-технической конференции, г. Минск, БНТУ, 2008.
8. Бохан, А.Н. Эскалация перенапряжений в распределительной сети с высоковольтными электродвигателями / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок, С.Н. Прохоренко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы VIII Междунар. межвуз. науч.–техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов, г. Гомель, 28–29 апр. 2008.
9. Бохан, А.Н. Влияние динамических свойств ОПН на уровни перенапряжений в распределительной сети / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок, С.Н. Прохоренко // Металл–2008 : сборник тезисов международной научно-технической конференции, г. Жлобин, БМЗ, 2008.

10. Бохан, А.Н. Экспериментальное исследование и моделирование МОВ на основе ZnO / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок // сборник материалов 4-й международной НТК, г. Гомель, – 2004. – С. 156–159.

11. Кротенок, В.В. Диагностика выключателей в распределительных сетях / В.В. Кротенок, В.С. Овсянников // сборник материалов III МНТК студентов аспирантов и магистрантов, г. Гомель, 2003. – С. 203–205.

12. Бохан, А.Н. Дуговые перенапряжения в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок // Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование : сборник материалов международной межвузовской НТК, МГТУ, г. Могилев, 2003. – С. 297–322.

13. Бохан, А.Н. Ограничение внутренних перенапряжений распределительной сети / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок // Современные проблемы машиностроения : тезисы докладов МНТК г. Гомель 2002. – С. 134–135.

14. Бохан, А.Н. Диагностика выключателей в распределительных сетях / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок // материалы конференции МНТК вузов приграничных регионов славянских государств, г. Брянск. – 2002. – С. 37–38.

15. Бохан, А.Н. Оптимизация местной установки и параметров ОПН для ограничения внутренних перенапряжений в распределительной сети / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок // материалы конференции МНТК вузов приграничных регионов славянских государств, г. Брянск. – 2002. С. 48–50.

16. Бохан, А.Н. Исследование переходных процессов при замыканиях на землю в распределительных сетях / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок // сборник материалов 4-й Международной межвузовской НТК, г. Гомель. 2001. – С.139–142.

Патенты

17. Устройство глубокого ограничения перенапряжений в электросети : пат. 8922 Респ. Беларусь, ВУ С1 Н02Н 9/0,4 9/00 / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок, В.С. Овсянников; заявитель ГГТУ им. П.О. Сухого. – № а 20040207; заявл. 15.03.2004; опубл. 28.02.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 2. – С. 184.

РЭЗІЮМЕ

Крацянок Уладзімір Уладзіміравіч

Павышэнне эфектыўнасці абмежавання перанапружанняў у размеркавальнай сетцы пры дугавых замыканнях на зямлю.

Асноўныя тэрміны: перанапружанне, аднафазнае замыканне на зямлю, абмежавальнік перанапружанняў нелінейны (АПН), эксперыментальная устаноўка, зазямленне нейтралі.

Аб'ект даследавання – сродкі абмежавання перанапружанняў у размеркавальных сетках сярэдняй напругі (6–35 кВ) электраэнергетычных сістэм. Прадмет даследавання – метады і тэхнічныя сродкі абмежавання перанапружанняў у размеркавальных сетках сярэдняй напругі пры дугавых замыканнях на зямлю, з выкарыстаннем абмежавальнікаў перанапружання нелінейных (АПН).

Мэта работы – паніжэнне ўзроўняў перанапружання у размеркавальных сетках пры аднафазных дугавых замыканнях на зямлю. **Метады даследавання.** Для рашэння пастаўленых задач выкарыстоўвалася комплексная метадыка даследавання, якая ўключае метады тэарэтычнага аналізу, матэматычнага мадэліравання і вылічальнага эксперыменту. Для пацверджання тэарэтычных высноў і абгрунтавання параметраў мадэлі былі зроблены натурныя эксперыментальныя даследаванні АПН з выкарыстаннем лічбавага рэгістратара.

Атрыманыя вынікі і навізна. Распрацавана мадэль размеркавальнай сеткі з АПН для даследавання перанапружанняў пры дугавых замыканнях на зямлю, якая дазваляе падысціць правільнасць вынікаў вылічальнага эксперыменту. У распрацаванай мадэлі АПН упершыню было ўлічана яго запазненне пры пераходзе ў праводзячы стан. Адекватнасць распрацаванай мадэлі пацверджана параўнаннем вынікаў натурнага і вылічальнага эксперыменту. Карэляцыя натурных і разліковых значэнняў склала 0,95. Вызначаныя разліковыя ўзроўні максімальных перанапружанняў пры замыканнях на зямлю ў размеркавальных сетках з розным рэжымам зазямлення нейтралі пры змене месца ўстаноўкі АПН і параметраў размеркавальнай сеткі. Распрацаваная эксперыментальная ўстаноўка для даследавання характарыстык АПН пры адначасовым уздзеянні напружанняў прамысловай і высокай частаты. Устаноўка можа быць выкарыстана для дыягностыкі АПН. Навізна распрацаванай прылады глыбокага абмежавання перанапружання пацверджана патэнтам Рэспублікі Беларусь. **Вобласць ужывання** – арганізацыі і прадпрыемствы, электрыфікацыя якіх праходзіць пасродкам размеркавальных сетак сярэдняга напружання.

РЕЗЮМЕ

Кротенок Владимир Владимирович

Повышение эффективности ограничения перенапряжений в распределительной сети при дуговых замыканиях на землю

Ключевые слова: перенапряжение, однофазное замыкание на землю, ограничитель перенапряжений нелинейный (ОПН), экспериментальная установка, заземление нейтрали.

Объект исследования – средства ограничения перенапряжений в распределительных сетях среднего напряжения (6–35 кВ) электроэнергетических систем. **Предмет исследования** – методы и технические средства ограничения перенапряжений в распределительных сетях среднего напряжения при дуговых замыканиях на землю, с применением ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН).

Цель работы – снижение уровней перенапряжений в распределительных сетях при однофазных дуговых замыканиях на землю. **Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовалась комплексная методика исследования, включающая методы теоретического анализа, математического моделирования и вычислительного эксперимента. Для подтверждения теоретических выводов и обоснования параметров моделей выполнены натурные экспериментальные исследования ОПН с использованием цифрового регистратора.

Полученные результаты и новизна. Разработана модель распределительной сети с ОПН для исследования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю, которая позволяет повысить достоверность результатов вычислительного эксперимента. В разработанной модели ОПН впервые учтено его запаздывание при переходе в проводящее состояние. Адекватность разработанной модели подтверждена сравнением результатов натурального и вычислительного эксперимента. Корреляция натуральных и расчетных данных составила 0,95. Определены расчетные уровни максимальных перенапряжений при замыканиях на землю в распределительных сетях с различным режимом заземления нейтрали при изменении места установки ОПН и параметров распределительной сети. Разработана экспериментальная установка для исследования характеристик ОПН при одновременном воздействии напряжений промышленной и высокой частоты. Установка может быть использована для диагностики ОПН. Новизна разработанного устройства глубокого ограничения перенапряжений подтверждена патентом Республики Беларусь. **Область**

применения – организации и предприятия, электрификация которых осуществляется посредством распределительных сетей среднего напряжения.

Репозиторий БНТУ

SUMMARY

Krotенок Vladimir Vladimirovich

Increase of efficiency of restriction of overvoltages in a distributive net at arc short circuits on the earth

Keywords: an overvoltage, a single-phase short circuit on the earth, a limiter of overvoltages nonlinear (LON), an experimental facility, an neutral ground.

Object of research – means of restriction of overvoltages in distributive nets of average voltage (6–35 кВ) of electrical power systems. **Subject of research** – methods and technical means of restriction of overvoltages in distributive nets of average voltage at arc short circuits on the earth using limiters of overvoltages nonlinear (LON).

Work purpose – decrease in levels of overvoltages in distributive nets at single-phase arc short circuits on the earth. **Research methods.** For solution of tasks in view the complex system of research including methods of the theoretical analysis, mathematical modelling and computing experiment was used. For confirmation of theoretical conclusions and substantiation of parameters of models the natural experimental researches of LON with use of the digital registrar are executed.

Results received and novelty. The model of a distributive net with LON is developed for research of overvoltages at arc short circuits on the earth which allows to raise reliability of results of computing experiment. In developed model of LON its delay at transition in spending condition is considered for the first time. The adequacy of developed model is confirmed by comparison of results of natural and computing experiment. The correlation of natural and calculation data has made 0,95. The calculation levels of maximum overvoltages are defined at short circuits on the earth in distributive nets with a various mode of neutral ground at change of facility place of LON and parameters of a distributive net. The experimental facility is developed for research of characteristics of LON at simultaneous influence of voltage of industrial and high frequency. The facility can be used for diagnostics LON. The novelty of the developed device of deep restriction of overvoltages is confirmed by patent of Republic of Belarus. **Field of application** – organisations and enterprises which electrification is carried out by means of distributive nets of average voltage.



Научное издание

КРОТЕНОК Владимир Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГРАНИЧЕНИЯ
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ
ПРИ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.02 – Электростанции
и электроэнергетические системы

Подписано в печать 6.05.2010

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,28. Уч.–изд. л. 1,00. Тираж 60. Заказ 476.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.