


На правах рукописи



Финашин Роман Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНО-РЕЗИСТИВНОГО
ЗАЗЕМЛЕНИЯ И УСТРОЙСТВА ГЛУБОКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-35 кВ**

Специальность: 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Качесов Владимир Егорович**
доктор технических наук, профессор,

Официальные оппоненты: **Рыжкова Елена Николаевна**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, кафедра «Электроснабжения промышленных предприятий», профессор кафедры;

Кажекин Илья Евгеньевич
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», г. Калининград, кафедра «Электрооборудования судов и электроэнергетики», доцент кафедры.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Защита диссертации состоится «25» июня 2020 года в 15:00 часов в конференц-зале первого корпуса на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации: www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» апреля 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Во многих зарубежных странах и Российской Федерации в настоящее время локальное перераспределение электроэнергии потребителям происходит по электрическим сетям (ЭС) среднего напряжения (СН) с неэффективно заземленной нейтралью. В Российской Федерации среди всех ЭС СН 6-35 кВ преобладают сети с изолированной нейтралью (ИН) – их протяженность достигает 70% от суммарной.

Наиболее частым видом нарушения нормального режима в рассматриваемых ЭС выступает однофазное замыкание на землю (ОЗЗ), большинство которых имеет дуговой характер (ОДЗ). Доля ОЗЗ от общего количества замыканий составляет от 30% до 80%. Длительный процесс горения перемежающейся (неустойчивой) дуги приводит к многократным дуговым перенапряжениям (ДП) с амплитудой до $3,1 \dots 3,2 U_{ф.m}$ ($U_{ф.m}$ - амплитудное значение фазного напряжения ЭС). Перенапряжения указанной кратности наиболее характерны для ЭС с ИН.

Несомненным преимуществом ЭС с изолированной нейтралью является возможность передачи электроэнергии потребителям даже при ОЗЗ. Однако, негативное влияние тока ОЗЗ и длительные дуговые перенапряжения часто вынуждают прерывать электроснабжение для предотвращения развития замыкания (повреждения). Вызываемые перемежающимся замыканием перенапряжения на неповреждённых фазах негативно влияют на фазную изоляцию оборудования (приводят к ее деградации); замыкание может развиваться в междуфазное короткое замыкание, требующее отключение электропотребителя. При таких отключениях потребитель несет экономические потери. Мероприятия по снижению отрицательного воздействия перенапряжений на изоляцию оборудования ЭС должны быть направлены, в основном, на сокращение амплитуды и количества (длительности) перенапряжений.

Заземление нейтрали ЭС с малыми токами замыкания на землю посредством высокоомного резистора позволяет снизить кратности дуговых перенапряжений, а посредством низкоомного резистора – исключить их появление. Возможность данных способов заземления уменьшать урон от последствий ОДЗ очевидна, однако, в случаях применения *низкоомного резистора* необходимо своевременное отключение фидера с ОДЗ, что может приводить к полному отключению электропотребителей, у которых отсутствует автономный источник питания или резервные питающие фидеры. Данное обстоятельство снижает критерии надёжности и качества электроснабжения. В *сетях с высокоомным резистивным заземлением* увеличивается ток в месте замыкания в установившемся режиме, снижая электробезопасность ЭС. Для сетей с большими емкостными токами замыкания на землю (ЕТЗЗ) эффективно применение дугогасящих реакторов (ДГР), но оно не оправдано в сетях с малыми ЕТЗЗ и с большим содержанием в токе высших гармонических

составляющих. Относительно сложные системы управления реакторами также ограничивают область их использования.

В работе исследован новый способ *импульсно-резистивного заземления* (ИРЗ) нейтрали ЭС СН и разработано устройство, реализующее этот способ. Уровень ограничения дуговых перенапряжений путем применения известных способов заземления ограничивается диапазоном $2,2-2,4U_{ф.м}$. Дальнейшее снижение перенапряжений вплоть до значений близких к линейному позволит увеличить ресурс изоляции и, соответственно, срок службы оборудования. Поэтому для рассматриваемых ЭС исследована возможность применения нового способа и устройства глубокого ограничения (ГО) дуговых перенапряжений.

Исследования (теоретические и экспериментальные), выполненные с целью всестороннего анализа нового способа заземления, и апробации устройства, реализующего этот способ, а также устройства, глубоко ограничивающего дуговые перенапряжения, направлены на снижение эксплуатационных потерь, повышение надежности работы ЭС, ее электробезопасности и экологичности.

Степень разработанности темы.

Работы в области оптимизации режима нейтрали сетей 6–35 кВ в СССР и Российской Федерации активно велись такими учеными как Ч.М. Джуварлы, Ф.А. Лихачевым, Р.А. Вайнштейном, И.М. Сиротой, Г.А. Евдокуниным, К.П. Кадомской, Ф.Х. Халиловым и многими другими, включая зарубежных. Причиной служил большой поток аварийных ситуаций (отключений) в этих сетях. Характер аварийных переходных электромагнитных процессов при замыканиях на землю был изучен В.Г. Гольдштейном, В.А. Шуиным, В.Ф. Сивокобыленко. Н.Н. Беляков наряду с В. Петерсеном (W.Petersen) указал на эффективность высокоомного заземления нейтрали ЭС посредством постоянного резистора. С 20-х годов прошлого века предлагалось применять именно такое непосредственное (постоянное) резистивное заземление. В настоящее время недостатки такого постоянного высокоомного резистивного заземления могут быть устранены.

Цель и задачи работы.

Целью работы является разработка и создание средств повышения надёжности передачи электроэнергии, в частности снижения опасных перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях СН 6-35 кВ, которые приводят к деградации и разрушению изоляции и увеличивают поток аварийных отключений.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи, а именно:

- теоретически доказана возможность применения ИРЗ в сетях СН на основе слежения за значением производной напряжения в нейтрали ЭС;
- разработана компьютерная модель и выполнено моделирование электромагнитных переходных процессов в ЭС с ИРЗ и устройством ГО дуговых перенапряжений;

- изготовлена низковольтная физическая модель ЭС с постоянным и новым импульсно-резистивным способом заземления нейтрали для проведения лабораторных работ со студентами;

- показаны технические и экономические преимущества нового способа ИРЗ;

- рассчитаны характеристики, подобраны элементы и изготовлены опытные прототипы устройств ГО и ИРЗ;

- проведены лабораторные испытания устройства ИРЗ высоким напряжением и нагрузочным током.

Методы исследований:

- Математическое/аналитическое моделирование исследуемых установившихся и переходных электромагнитных процессов с использованием теории электрических цепей;

- схемотехническое компьютерное моделирование посредством апробированного программного обеспечения;

- активный целенаправленный эксперимент, выполненный как на существующих лабораторных установках, так и на специально разработанных.

Научная новизна положений и результатов работы:

1. Вне зависимости от способа неэффективного заземления нейтрали электрических сетей 6-35 кВ (изолированная нейтраль, заземленная через ДГК или высокоомный резистор) производная напряжения в нейтрали подавляющего большинства таких ЭС при неустойчивых (перемежающихся) замыканиях на землю имеет большое значение, достаточное для классификации такого вида замыкания и запуска устройств, реализующих способ импульсно-резистивного заземления.

2. Разработаны полноценные математические модели распределительных электрических сетей с импульсно резистивным заземлением нейтрали, детально учитывающие работу полупроводниковых приборов, включая временной разброс включения симисторов, и позволяющие оптимизировать конструкции устройств ИРЗ на стадиях их проектирования и модернизации.

3. Симисторы с большими временами включения в устройствах ИРЗ могут приводить к перегреву их защитных варисторов и, в итоге, к повреждению всего ключа. Исключение такого перегрева выполняется посредством специально разработанного устройства управления в составе устройства ИРЗ. Для защиты «медленных» симисторов рекомендовано применение варисторов повышенной энергоемкости (мощности).

4. В качестве высоковольтного ключа в устройствах ИРЗ принципиально могут применяться управляемые вакуумные разрядники (РВУ), однако, область их устойчивых рабочих разрядных токов начинается с 80А. При меньших разрядных токах происходит «натренировка» РВУ. Значительные разрядные токи разрядников ограничивают их применение в электрических сетях с нормируемыми ПУЭ емкостными токами замыкания на землю.

5. В устройстве глубокого ограничения дугowych перенапряжений целесообразно применять составной ограничитель перенапряжений

нелинейный (ОПН), нижнее плечо которого шунтируется высоковольтным ключом, а верхнее обеспечивает глубокий уровень ограничения дуговых перенапряжений. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) нижнего плеча скоординирована с составной ВАХ защитных варисторов.

Личный вклад соискателя состоит в:

- участии в соавторстве в постановке целей и задач диссертационных исследований;
- разработке математических моделей переходных процессов, сопровождающих однофазные замыкания на землю в сетях с разветвленной топологией;
- постановке и проведении экспериментальных исследований, связанных с разработкой устройств ИРЗ и ГО ДП;
- обработке результатов лабораторных и компьютерных экспериментов и формировании технических требований к системе запуска полупроводникового ключа устройств ИРЗ и ГО дуговых перенапряжений;
- участии в разработке оригинальной конструкции устройств ИРЗ и ГОДП;
- участии в разработке устройств управления полупроводниковыми составными симисторными ключами;
- экспериментальном исследовании основных характеристик разрядника вакуумного управляемого (РВУ).

Практическая значимость результатов работы:

1. Для тестирования устройств ИРЗ разработана и апробирована высоковольтная испытательная установка, в которой посредством вакуумного выключателя создается переходный колебательный процесс с заданной частотой свободных колебаний, возникающих при перезаряде батарей конденсаторов через специальный высоковольтный дроссель.

2. На низком и высоком напряжениях экспериментально определен уровень чувствительности устройства ИРЗ, созданного на основе высоковольтного составного симисторного ключа.

3. Изготовлено и испытано на высоком напряжении устройство импульсно-резистивного заземления нейтрали электрических сетей 6-10 кВ, рассчитанное на ток до 20 А.

4. Разработан, обеспечен методическими материалами и внедрен в учебный процесс лабораторный стенд – электрофизическая установка, моделирующая замыкания на землю в сетях с неэффективно заземленной нейтралью и использующая новый импульсно-резистивный способ.

Достоверность основных результатов работы основывается на их подтверждении в ходе проведенных лабораторных экспериментов и хорошем их согласии с результатами компьютерного моделирования и аналитических расчетов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Импульсно-резистивное заземление нейтрали ЭС принципиально снижает энерговыделение в нейтрали-заземляющем резисторе при временных

интервалах между повторными зажиганиями дуги около полупериода промышленной частоты на ~30% по сравнению с режимом его постоянного подключения к нейтрали и устойчивом ОЗЗ; при заметном снижении электрической прочности дефектного участка фазной изоляции и сохранении такого же интервала между повторными зажиганиями дуги, снижение энерговыделения происходит в несколько раз.

2. Напряжение на нейтрали электрической сети на 1-ом начальном (волновом) этапе замыкания может быть определено по методике, в которой затухание волны напряжения нулевой последовательности, распространяющейся к центру питания от места замыкания, учитывается посредством расчета ее преломлений на распределительных ПС, а увеличение длительности фронта учитывается как произведение удельного метрического коэффициента t_d на полное расстояние до центра питания. На основе найденного напряжения НП на шинах центра питания напряжение на выходе дифференцирующе-запускающей цепи (ДЗЦ) определяется решением несложной системы дифференциальных уравнений, записанной для контура второго порядка.

3. Гарантированная низкочастотная «медленная» составляющая производной напряжения в нейтрали ЭС определяется амплитудой свободной перезарядной составляющей переходного процесса замыкания фазы на землю; в относительных единицах она рассчитывается по выражению: $du_N/dt_{II} \cong 2A\beta_1/3$, где A и β_1 – амплитуда и частота свободных перезарядных колебаний (на втором этапе замыкания).

4. В системе управления устройством глубокого ограничения ДП должна быть задана необходимая длительность отпирающего импульса ($t_{отп}$), обеспечивающего надежное открытие составного симисторного ключа: значение $t_{отп}$ должно быть соизмеримо или превышать полупериод свободных перезарядных колебаний в ЭС, т.е. $t_{отп} \geq \pi/\beta_1$.

Апробация работы и публикации.

Результаты работы обсуждались на семинарах кафедры ТЭВН и Факультета энергетики НГТУ (2015-2019 гг.), на Международных научно-технических конференциях: «Состояние и перспективы развития электро и теплотехники» (г. Иваново, ИГЭУ, 2015 г.), XIII Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современного общества» (НГТУ, 2016 г.), на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НГТУ, 2015г.).

Результаты работы в виде лабораторного стенда внедрены в учебный процесс подготовки магистров каф. ТЭВН НГТУ. Департаментом Энергетики мэрии г. Новосибирска рекомендована опытная эксплуатация устройства ИРЗ в электрических сетях 6-10 кВ АО «РЭС» и ОАО «РЖД». Акты о внедрении и использовании результатов диссертационной работы включены в её текст в виде соответствующих приложений.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 научных работах. Из них работ, опубликованных согласно перечню российских

рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК) – 2, а также в патентах РФ на изобретение и полезную модель – 2; в научных изданиях, индексируемых базами SCOPUS - 1.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений, содержащего 102 наименования. Объем работы составляет 168 страниц, включая 99 рисунков и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проведен анализ работ, связанных с исследованиями перенапряжений, возникающими при однофазных дуговых замыканиях в распределительных ЭС. Дано обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию характеристик сети и процессам, происходящим при ОДЗ в ЭС СН. Наиболее уязвимыми в ЭС 6-10 кВ при воздействии внутренних перенапряжений являются кабели и места их соединений (кабельные муфты). В воздушно-кабельных сетях большее число повреждений приходится на опорные и проходные изоляторы (20%) и коммутационные аппараты (свыше 20%). Степень опасности замыканий в трёхфазных ЭС, включая распределительные, по большей части, зависит от состояния нейтрали электрической сети (способе и эффективности её заземления). Проанализированы основные способы заземления нейтрали – через ДГР, низкоомный/высокоомный резистор и изолированная нейтраль; показаны их преимущества и недостатки.

Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей допускают работу ЭС с изолированной нейтралью в режиме однофазного замыкания до обнаружения и ремонта места повреждения, поиск которого может занимать длительное время: оперативным персоналом на подстанции может быть не замечен факт замыкания на линии из-за его неустойчивости (неустойчивое ОЗЗ), а выделение поврежденного фидера иногда выполняется путем его включения-отключения. В ЭС с изолированной нейтралью дуговые перенапряжения значительной кратности оказывают наиболее длительное негативное воздействие на изоляцию.

В ЭС с малыми ЕТЗЗ более перспективным является высокоомное резистивное заземление. Показано, что резистор практически не влияет на разрядную и перезарядную составляющие тока замыкания. Положительным является снижение напряжения пика гашения, что уменьшает вероятность повторных пробоев фазной изоляции. Но высокоомное резистивное заземление приводит к увеличению установившегося тока ОЗЗ - при резистивном коэффициенте компенсации $K_I = I_R / I_C = 1$ в $\sqrt{2}$ раз. Это сопровождается ухудшением условий самогашения заземляющей дуги, усилением ее

разрушающих воздействий, дополнительными потерями энергии в нейтрале-заземляющем резисторе, снижением электробезопасности и экологичности ЭС. В связи с этим концепция высокоомного резистивного заземления требует переосмысления и доработки. Применение нового импульсно-резистивного способа заземления, устраняющего недостатки постоянного заземления, является альтернативным решением.

Вторая глава посвящена теории импульсного резистивного заземления. Устройство ИРЗ реагирует на производную напряжения в нейтрали ЭС и подключает нейтрале-заземляющий резистор к контуру заземления (станции или подстанции) только при неустойчивых (перемежающихся) дуговых замыканиях (ОДЗ/НОЗЗ), а при устойчивых (УОЗЗ) – автоматически отключает. УОЗЗ характеризуется наличием малой производной (скорости изменения) напряжения на нейтрали ЭС, максимальное значение которой пропорционально произведению угловой промышленной частоты на фазное напряжение

$(du_N/dt)_m \approx U_{\phi m} \omega$, т.е. при напряжении, близком к синусоидальному, приблизительно (в относительных единицах) равно $\sim 100\pi$ (рад/с). При горении неустойчивой дуги (ОДЗ) напряжение в нейтрали ЭС содержит широкий спектр частот свободных колебаний, вызываемых пробоями изоляции. Частоты свободных колебаний слабо зависят от способа заземления нейтрали. Их диапазон для большинства ЭС составляет 500-3000 Гц. Показано, что скорость изменения напряжения (его производная) в нейтрали ЭС при ОДЗ многократно больше

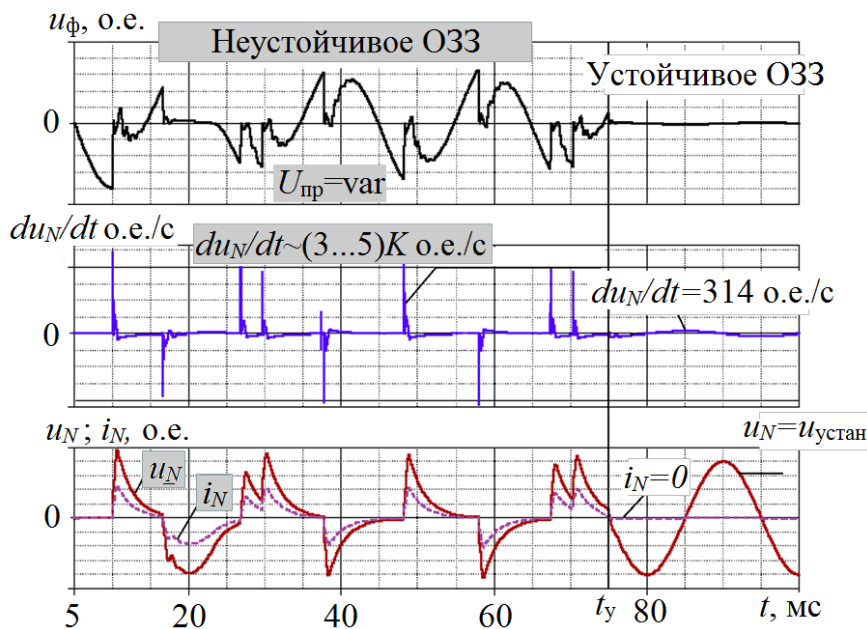


Рис.1 - Процесс дугового замыкания с повторными пробоями (неустойчивое ОЗЗ), значение производной напряжения на нейтрали (du_N/dt), напряжение на нейтрали (u_N) и ток в резисторе (i_N), а также вид процессов при устойчивом ОЗЗ

производной при УОЗЗ ($du_N/dt_{\text{ОДЗ}} > du_N/dt_{\text{УОЗЗ}}$). Данное условие принципиально позволяет обеспечить селективное срабатывание ИРЗ только при ОДЗ. Зная частоты собственных колебаний сети при однофазном замыкании, приблизительно можно оценить значение производной. На рис. 1 показано различие между процессами при НОЗЗ и УОЗЗ. Условно можно выделить два основных типа свободных колебаний, формирующих импульс напряжения на нейтрали ЭС: перезарядные с круговой частотой β_1 и разрядные с частотой β_2 . Первые (с более низкой частотой) обусловлены перезарядными процессами

ёмкостей неповрежденных фаз через эквивалентный источник, вторые (более высокочастотные) – разрядом емкости поврежденной фазы через канал дуги и собственную индуктивность поврежденной линии. Аналитически или численно оценить частоты β_1 и β_2 , а также определить производную напряжения на нейтрали ЭС, можно посредством эквивалентной схемы замещения, представленной на рис. 2. После расчета переходного процесса численно определяется производная напряжения (du_N/dt) от напряжения на нейтрали, записываемого как:

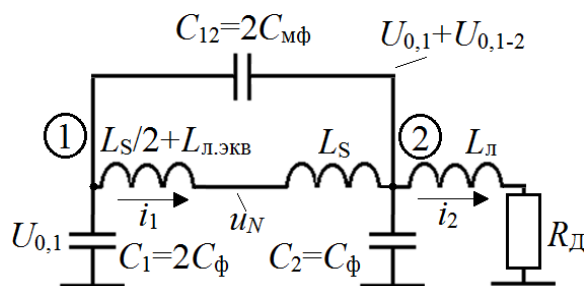


Рис. 2 - Эквивалентная расчетная схема замещения распределительной сети при замыкании на землю

Расчетные зависимости максимальной производной du_N/dt , представленные на рис. 3, показывают, что производная du_N/dt имеет большое значение, – она приблизительно в 20 раз больше производной на промышленной частоте и вполне достаточна для селекции неустойчивых ОЗЗ и запуска устройств ИРЗ.

Производная напряжения в нейтрали может быть оценена для ЭС с конкретными параметрами и топологией. Значение высокочастотной (ВЧ) составляющей производной напряжения на нейтрали ЭС, формируемой условно на первом этапе замыкания, приближенно можно определить с помощью анализа волновых процессов. По мере продвижения электромагнитной прямоугольной волны напряжения нулевой последовательности (НП) от места замыкания к центру питания (ЦП) фронт импульса увеличивается из-за отличия фазовых скоростей на разных частотах, а

$$u_N(t) = u_{c1} + u_{c12} \frac{0.5L_S + L_{Л.ЭКВ}}{1.5L_S + L_{Л.ЭКВ}},$$

где L_S – индуктивность источника (трансформатора); C_ϕ , $C_{м\phi}$ – фазная и междуфазная ёмкость; $R_Д$ – сопротивление канала дуги; $L_Л$ – индуктивность поврежденного фидера до места замыкания; $L_{Л.ЭКВ}$ – эквивалентная индуктивность неповрежденных линий.

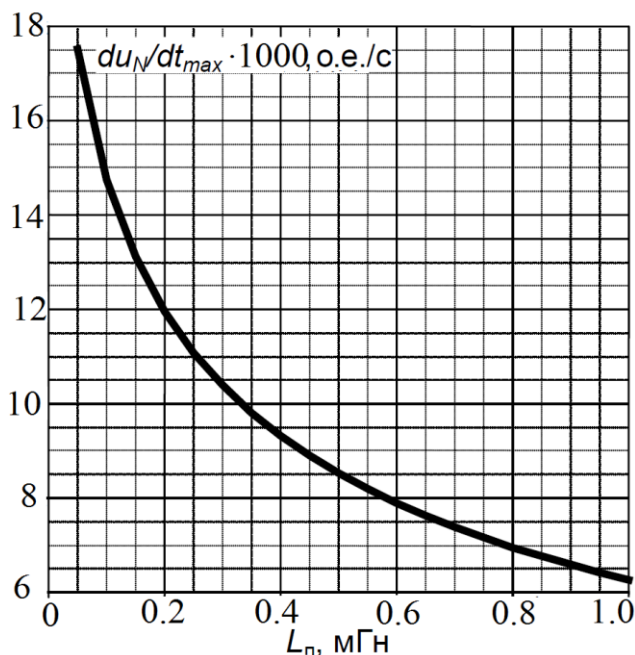


Рис. 3 - Расчетная зависимость максимальной производной напряжения в нейтрали распределительной кабельной сети от индуктивности поврежденного фидера (масштабный коэффициент по оси ординат $K=1000$)

также происходит уменьшение амплитуды импульса из-за его преломлений в местах присоединения нескольких линий к узлу (например, на подстанции). Длительность фронта импульса НП на шинах центра питания (и, соответственно, производная du_N/dt) напрямую зависит от суммарной протяженности линий до места ОДЗ.

На рис.4 показана радиальная сеть с m узлами. Для узла m с n линиями, коэффициент преломления будет равен

$$\alpha_m = \frac{2 \left(\sum_{j=2}^n \frac{1}{Z_{jm}} \right)^{-1}}{\left(\sum_{j=2}^n \frac{1}{Z_{jm}} \right)^{-1} + Z_{1m}},$$

где $Z_{j,m}$ - j -ое волновое сопротивление фидера ($j \in [2, n]$) в m -ом узле.

Амплитуда импульса напряжения в узле 1 (т.е. в ЦП) при условии воздействия импульса напряжения с амплитудой U_0 определяется по формуле:

$$U_{in} = \frac{\alpha_1}{2} U_0 \prod_{i=2}^m \alpha_i.$$

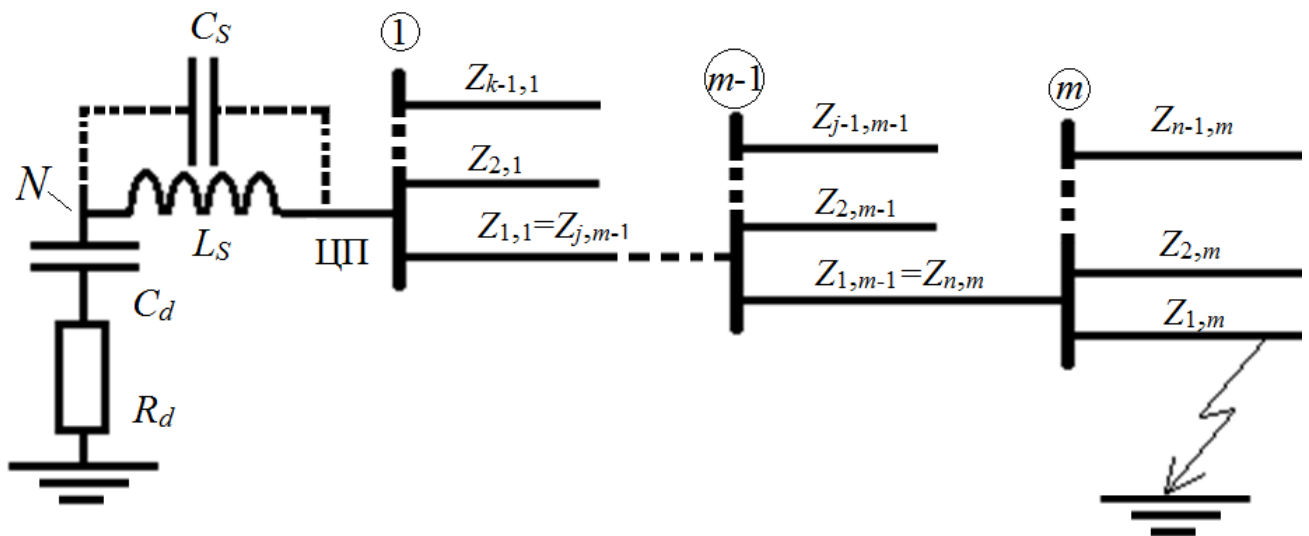


Рис. 4 - Однолинейная схема радиальной сети

Крутизна импульса напряжения НП, пришедшего на шины ЦП, рассчитывается с помощью метрического (удельного) коэффициента увеличения длительности фронта, равного для КЛ $t_d \approx 1,2 \dots 1,5$ нс/м, для ВЛ - 2,8 нс/м. Благодаря известной крутизне и амплитуде импульса напряжения НП определяется производная напряжения на выходе дифференцирующе-запускающей цепи (ДЗЦ) R_d-C_d в составе устройства ИРЗ.

Опробованы 3 метода аналитического расчета напряжения на выходе ДЗЦ $u_d(t)$, отличающиеся способом моделирования обмотки силового

трансформатора. В первом методе обмотка представляется активным сопротивлением, равным ее волновому сопротивлению ($Z_{стр}$). Недостатком метода является то, что он справедлив только для времени расчета, меньшего двух постоянных времени обмотки НН трансформатора: $t < 2\tau_{обм}$. Метод пригоден только для расчетов при крутых фронтах набегающего импульса U_{in} . При пренебрежении емкостью ошиновки, а также внутренним эквивалентным волновым сопротивлением ЭС R_{in} ($R_d + Z_{стр}/3 \gg R_{in}$) напряжение на выходе ДЗЦ определяется как:

$$u_d(t) = \frac{\frac{4}{t_\phi} 2U_{in} C_d R_d \left(e^{-t/C_d(R_d + Z_{стр})\tau} - e^{-\frac{4}{t_\phi}t} \right)}{\frac{4}{t_\phi} C_d (R_d + Z_{стр}) - 1}, \quad \text{для } t < 2\tau_{обм}$$

В качестве альтернативного (универсального) можно использовать второй метод. В нем обмотка НН трансформатора представляется индуктивностью рассеяния L_s , а также сопротивлением, отвечающим за потери на высоких частотах $R_{стр}$. В первом приближении (для получения не завышенных значений производной на выходе ДЗЦ) $R_{стр}$ можно не учитывать.

Напряжение на выходе ДЗЦ определяется как:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = u_{in} - u_{cd} - i_{cd} R_d, \\ C_d \frac{du_{cd}}{dt} = i_{cd}, \end{cases}$$

где u_{cd} , напряжение на ёмкости ДЗС (C_d), i_L – ток в L_s , i_{cd} равен:

$$i_{cd} = \frac{u_{in} - u_{cd} + R_{стр} i_L}{R_d + R_{стр}}.$$

Погрешности этого метода заключается в приближенности определения индуктивности обмотки трансформатора. Повысить точность расчёта можно, заменив обмотку линией с распределенными параметрами. Однако данный метод требует наличия информации о длине и, в целом, конструкции обмотки трансформатора. Расчет выполняется численными методами.

Для оценки работоспособности изложенных методик применительно к воздушным ЭС выполнено компьютерное моделирование переходного процесса замыкания на землю в сети с триадной древо-видной структурой, и получены напряжения на нейтрали ЭС и на

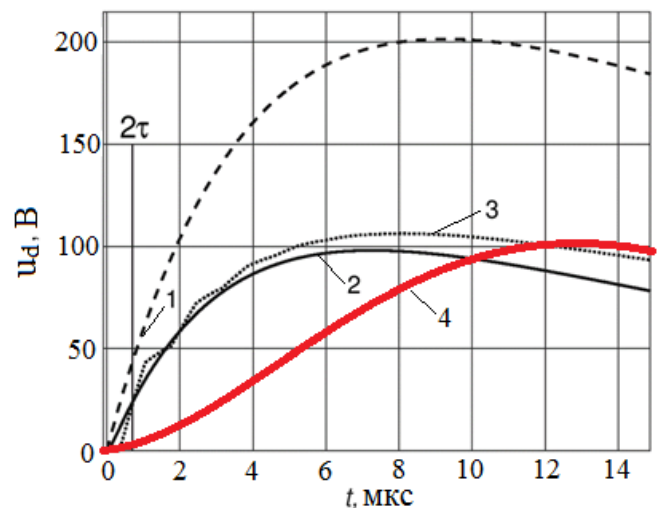


Рис. 5 - Зависимость напряжения на резисторе ДЗЦ для разных методов расчета (1-3) и компьютерного моделирования 4 (применительно к ЭС 10 кВ)

выходе ДЗЦ. Произведено сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами аналитических расчетов по 3-м методам.

На рис. 5 приведены результаты расчета напряжения на выходе ДЗЦ для 3-х методов. Погрешность аналитического расчета по методу 1 составила ~50%, а для методов 2 и 3 – лишь 5...10%.

Даже если напряжение на выходе ДЗЦ, найденное для ВЧ составляющей производной, оказывается малым, это не означает, что устройство ИРЗ не включится, поскольку НЧ составляющая производной дает значительный и гарантированный вклад в напряжение запуска. Напряжение на нейтрали ЭС $u_N(t)$ для НЧ составляющей производной грубо можно оценить как:

$$u_N(t) = -U_{\phi,m} \sin(\omega t + \varphi_3) + 2U_{\phi,m} [1 - C_{мф} / (C_{мф} + C_{\phi})] \cos(\beta_1 t) \sin(\varphi_3) / 3,$$

где φ_3 – фаза (угол) зажигания дуги однофазного замыкания. Максимальное напряжение на нейтрали будет при $\varphi_3 = \pi/2$. Для значений низших перезарядных частот (~0.5-1 кГц) напряжение на выходе ДЗЦ гарантированно в несколько раз выше напряжения промышленной частоты (50 Гц), которое устанавливается при устойчивом ОЗЗ. Таким образом, нейтрале-заземляющий резистор будет подключаться к нейтрали сети только при неустойчивых дуговых замыканиях на землю.

Одно из преимуществ ИРЗ – снижение потерь в самом нейтрале-заземляющем резисторе. Относительная энергия в резисторе с некоторым условным сопротивлением $R_N = 1$ Ом, выделяемая в течение полупериода промышленной частоты π/ω после самогашения заземляющей дуги при ИРЗ, равна:

$$E_{ИРЗ} = \int_0^{\pi/\omega} (U_{N0} e^{-\omega t})^2 dt = \frac{U_{N0}^2 (1 - e^{-2\pi})}{2\omega} \cong \frac{U_{N0}^2}{2\omega'}$$

где U_{N0} – теоретическое максимальное начальное напряжение на нейтрали сети по отношению к фазному максимальному значению ($U_{\phi,m}$) после самогашения заземляющей дуги.

Относительная энергия, выделяемая при устойчивом («металлическом») замыкании на землю и постоянно включенном заземляющем резисторе, равна:

$$E_R = \int_0^{\pi/\omega} \sin^2 \omega t dt = \frac{\pi}{2\omega'}$$

а отношение энергий:

$$\frac{E_{ИРЗ}}{E_R} = \frac{U_{N0}^2}{\pi}$$

Для максимального $U_{N0} = 1.5U_{\phi,m}$ снижение энерговыделения в резисторе R_N составит около 30% ($E_{ИРЗ}/E_R \cong 0.7$), но для более вероятного значения $U_{N0} \cong U_{\phi,m}$ $E_{ИРЗ}/E_R = 1/\pi$, т.е. поглощаемая резистором при ИРЗ энергия сокращается в три раза. При длительном горении заземляющей дуги напряжение пробоя изоляции и, соответственно, начальное напряжение на нейтрали сети заметно снижаются,

и соотношение энергий $E_{ИРЗ}/E_R$ становится еще меньше, но при условии, что сохраняется пауза между пробоями - около одного полупериода промышленной частоты.

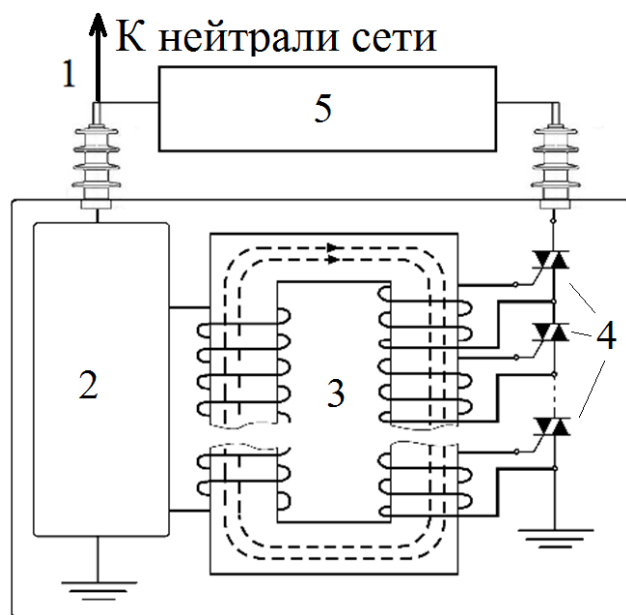


Рис.6 - Упрощенная схема устройства ИРЗ (1- вывод нейтрали ЭС, 2 - ДЗЦ, 3 - запускаящий (импульсный) трансформатор, 4 - симисторный блок, 5 - нейтрале-заземляющий резистор R_N

нейтрали ЭС и цепей управления полупроводниковыми ключами. Чувствительность симисторов, определяемая значением тока управления, заметно различается, и возможна ситуация невключения одного или нескольких приборов; самая неблагоприятная – неключение одного симистора. При этом на данный симистор через нейтрале-заземляющий резистор (5) будет прикладываться все напряжение между нейтралью и землей. Для исключения таких неблагоприятных режимов и предотвращения пробоя симисторов и перегрева их защитных варисторов предложено управление симисторным ключом посредством специального устройства управления (УУ), позволяющего гарантированно запускать ключ импульсами заведомо достаточной амплитуды и крутизны.

Третья глава посвящена исследованию электромагнитных переходных процессов и перенапряжений, происходящих при однофазных дуговых замыканиях на землю, разработке и изготовлению низковольтной физической лабораторной модели (стенда) с различными способами заземления нейтрали ЭС, включая ИРЗ.

В реальных ЭС при дуговых замыканиях на землю в силу сложной топологии ЭС кривые напряжений и токов замыкания заметно отличаются от теоретических, полученных для классической простейшей одночастотной схемы замещения. Но в большинстве случаев сочетание емкостно-индуктивных параметров ЭС таково, что самогашение дуги происходит в нуле колебаний

тока замыкания на перезарядной частоте (β_1). Этот механизм обрыва тока дуги описывает теория, предложенная В.Петерсенем. Второй вероятный механизм прерывания тока замыкания, в котором дуга гаснет в нуле тока промышленной частоты, описан Петерсом (E. Peters) и Слепяном (J. Slepian). Оба этих механизма реализованы в лабораторной установке.

Предварительная виртуальная реализация/апробация разработанной лабораторной физической модели осуществлена посредством компьютерного моделирования.

Переход от первого механизма горения дуги (по теории Петерсена) ко второму (теория Петерса и Слеряна) реализован благодаря электрофизическим свойствам обратного восстановления симисторов, моделирующих перемежающуюся дугу. Скорость и способность обратного восстановления симисторов определяется остаточным зарядом, накопленным между условными *p-n-p-n* структурами, а также инерционностью процесса восстановления при отключении индуктивной нагрузки. Поэтому при смене полярности симистору требуется некоторое время, чтобы переключиться/восстановиться на текущую полярность. Для моделирования перенапряжения по теории Петерса и Слепяна используется условно слаботочный, «медленный» симистор, время восстановления которого составляет несколько десятков микросекунд. За данный отрезок времени высокочастотная составляющая тока замыкания успевает быстро пересечь нулевое значение, симистор не успевает самовосстановиться и обрывает ток замыкания на землю только при следующих медленных переходах тока через ноль, но уже его основной промышленной компоненты. Реализация механизма горения дуги по теории Петерсена осуществляется переключением в схеме на более мощный «быстрый» симистор.

Полученные на разработанном лабораторном стенде осциллограммы токов замыкания и фазных напряжений, соответствующие обеим классическим теориям горения заземляющих дуг, имеют вид близкий к осциллограммам в реальных ЭС, поскольку электропитание стенда происходит от реальной трехфазной ЭС с присущими искажениями фазных напряжений. Лабораторный стенд позволяет воспроизвести эскалацию напряжения на нейтрали сети по теории Петерсена, которая

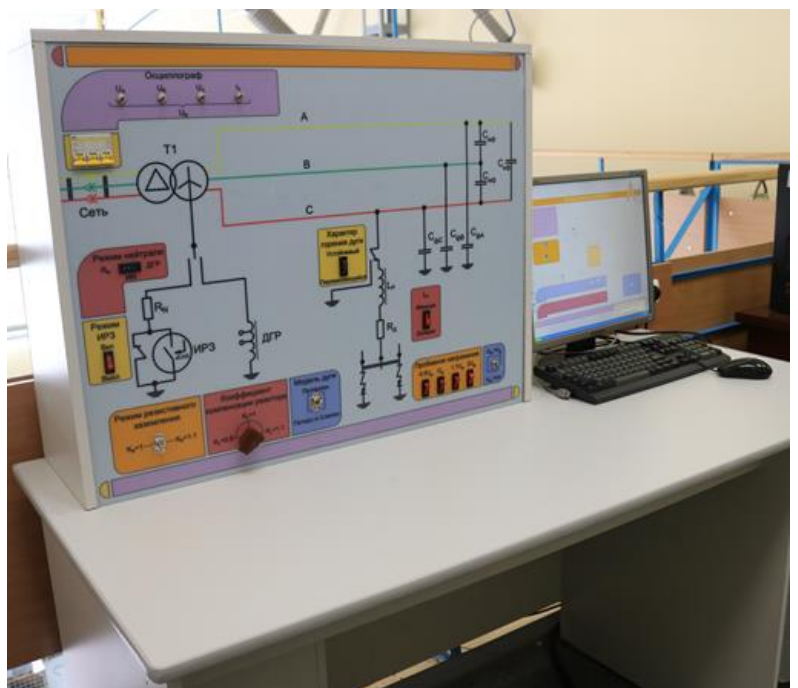


Рис.7 - Внешний вид лабораторной установки

может встречаться в реальных сетях лишь крайне редко и фрагментарно. Для моделирования ситуации, когда по каким-то причинам электрическая прочность дефектной изоляции увеличивается, предусмотрен набор динисторов с разными пробивными напряжениями. Внешний вид установки показан на рис.7.

Реализация разных способов заземления осуществляется подключением к выведенной нейтрали вторичной обмотки трансформатора резистора или катушки индуктивности (ДГК). Симистор для ИРЗ, подключающий нейтрале-заземляющий резистор к «земле» установки, управляется посредством дифференцирующе-запускающей RC-цепи. Вывод информации на монитор в виде осциллограмм напряжений на нейтрали, фазах, тока замыкания выполняется с помощью делителей напряжений, токового шунта, АЦП и соответствующего программного обеспечения.

На физической модели успешно апробировано ИРЗ. При переходе на режим установившегося замыкания наблюдается снижение тока замыкания в $\sqrt{2}$ раз по

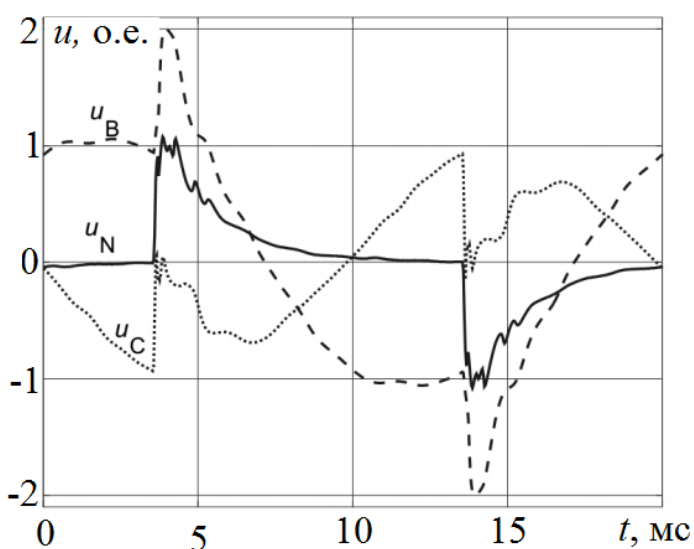


Рис.8 - Осциллограммы напряжений при дуговом замыкании на землю и работе ИРЗ. Теория горения дуги по Петерсену

сравнению с сетью с постоянным резистивным заземлением. Крайне слабое отличие напряжения на нейтрали установки при работе ИРЗ по сравнению с режимом постоянно подключенного нейтрале-заземляющего резистора обусловлено его быстрым подключением к нейтрали при однофазном замыкании фазы. Поэтому эффективность ИРЗ с точки зрения ограничения дуговых перенапряжений несколько не уступает постоянно подключенному нейтрале-заземляющему резистору (рис.8).

Созданная физическая лабораторная модель ЭС с неэффективно заземленной нейтралью используется в учебных целях при проведении лабораторных работ по курсу «Перенапряжения и координация изоляции». Она наглядно демонстрирует различие переходных процессов при разных способах заземления нейтрали.

В четвертой главе приводятся результаты апробации устройства ИРЗ посредством компьютерного моделирования, экспериментального тестирования составляющих ИРЗ, а также техническая и конструкционная реализация всего устройства.

Составной запускающий ключ построен на базе симисторов 12-16 классов, рассчитанных на ток 25 А. Применение симисторов с заметно большим номинальным напряжением сопряжено с требованием увеличения мощности запускающего импульса, а также с разительным удорожанием устройства ИРЗ.

На управляющие электроды симисторов управления подаются импульсы напряжения, соответствующие их работе в I-м и III-м квадрантах. Защита полупроводниковых ключей от перенапряжений в процессе последовательного открытия обеспечивается защитными варисторами, шунтирующими симисторы. Проведены лабораторные высоковольтные испытания защитных варисторов и их монтаж в опытный образец ИРЗ.

Основой составного ключа ИРЗ является запускающий трансформатор (ЗТ). Он спроектирован, сконструирован и изготовлен на рабочее напряжение не менее 10 кВ. Установлено, что применение новых диэлектрических аэрозольных покрытий с высокой адгезией позволяет эффективно (до ~40%) увеличить электрическую прочность каркаса ЗТ. Применительно к разработанной конструкции ЗТ указанное покрытие позволяет использовать в качестве материала каркаса запускающего трансформатора более дешевые и доступные полимеры, используемые в 3D печати.

На этапе сборки прототипа ИРЗ проведены высоковольтные испытания его составного симисторного ключа. Экспериментально выявлена потенциальная опасность выхода из строя одного из защитных варисторов из-за его перегрузки по мощности, вызванной высоким приложенным напряжением в течении времени между включениями двух последних (по времени) симисторов $\Delta t_{з.мах}$. Показано, что большой разброс времен включения симисторов может привести к тепловой перегрузке защитных варисторов, что повлечет повреждение устройства ИРЗ. Для исключения этого нужно отбирать чувствительные к включению симисторы, также обладающие одинаковыми временами включения. Одновременно необходима доработка системы запуска, которая бы включала функцию амплитудной селекции импульсов запуска ключей. Однако данный подход связан с большими трудозатратами. Более простым и универсальным решением является использование специального устройства управления.

Применение устройства управления (УУ) включением ключей позволяет исключить незапуск одного или нескольких симисторов и добиться более одновременного отпирания симисторов независимо от крутизны производной напряжения в нейтрали ЭС. Наличие УУ обеспечивает также возможность изменения чувствительности устройства ИРЗ в широком диапазоне.

Для устройства ИРЗ разработана детальная компьютерная модель, в которой учтен разброс чувствительности симисторов к их отпиранию. В модели ЗТ используется апробированная модель магнитного сердечника, предложенная Джилсом и Атертоном. Результаты моделирования переходных процессов, возникающих при работе устройства ИРЗ, хорошо согласуются с результатами экспериментальных измерений на реальном устройстве, что позволяет эффективно выполнять работы по его модернизации/модификации с помощью разработанной модели.

В работе исследована возможность применения управляемых вакуумных коммутационных аппаратов - разрядников. Проведены лабораторные испытания разрядника управляемого вакуумного (РВУ-73) на предмет возможности его

применения в качестве заземляющего ключа. К сожалению, область устойчивых разрядных токов современных РВУ начинается приблизительно с 80А, что накладывает ограничение на их использование в ЭС с малыми ЕТЗЗ. Выявлен недостаток РВУ – разряд через большое разрядное сопротивление, при котором не происходит основной сильноточной пробой, приводит к «натренировке» запального промежутка, т.е. его электрическая прочность увеличивается. Это также осложняет применение РВУ в качестве заземляющего ключа в устройствах ИРЗ. Для применения таких разрядников в качестве коммутаторов, необходимо, чтобы они соответствовали следующим требованиям:

1. Небольшое напряжение поджига (~1-2 кВ).
2. Энергия поджигающего разряда должна приблизительно составлять $E_3 \cong 4 \text{ мДж}$.
3. Стоимость разрядника должна соответствовать стоимости серийно-выпускаемого аппарата и быть конкурентной высоковольтным симисторам (тиристорам).
4. Разрядные токи должны начинаться от единиц Ампер.

Разработанное устройство-прототип для ИРЗ испытано высоким напряжением промышленной частоты (16 кВ), а также нагружено током близким к рабочему значению. Автоматическая система охлаждения устройства протестирована при протекании по ключу тока 12А. Температура симисторов не превысила 60 C^0 .

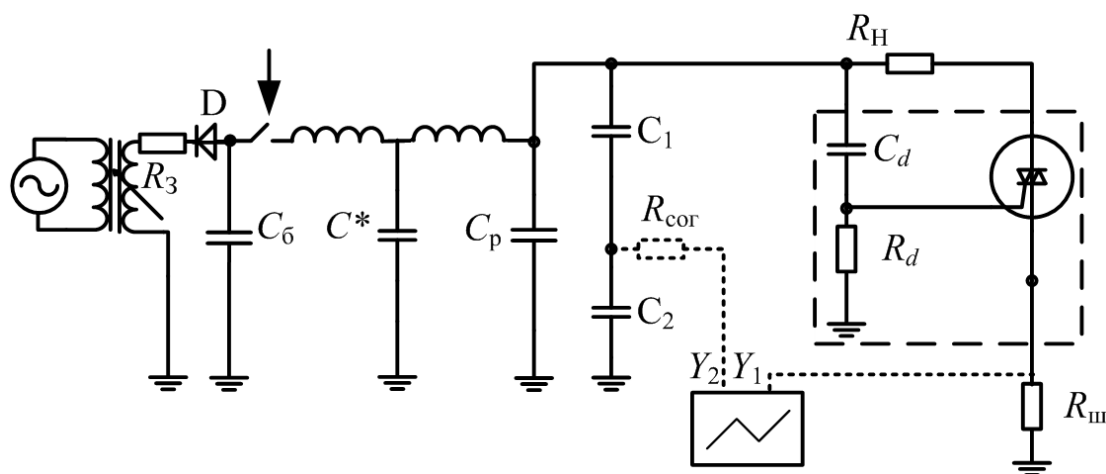


Рис.9 - Схема испытательной лабораторной установки; ИРЗ выделено пунктиром, D– диод, R_3 - защитный резистор

Для определения чувствительности устройства и одновременного испытания напряжением и током разработана высоковольтная установка, показанная на рис.9, генерирующая импульсы синусоидальной формы и регулируемой амплитуды на устройство ИРЗ. Колебательный характер импульсов позволяет приблизительно воспроизвести форму фронта напряжения на нейтрали реальной ЭС при замыканиях на землю.

Установка способна генерировать колебательный импульс напряжением до 10 кВ и током в симисторном ключе - 20А. В ходе испытаний получены

осциллограммы напряжения на ключе ИРЗ и протекающего в нем тока. Экспериментально определен порог чувствительности устройства. Минимальное напряжение на ключе при котором возможно срабатывание ИРЗ с разработанным устройством управления и ДЗЦ составило 1.44 кВ ($0.17 U_{\phi.m}$ для сети 10 кВ) при частоте колебаний ~ 2 кГц (рис. 10).

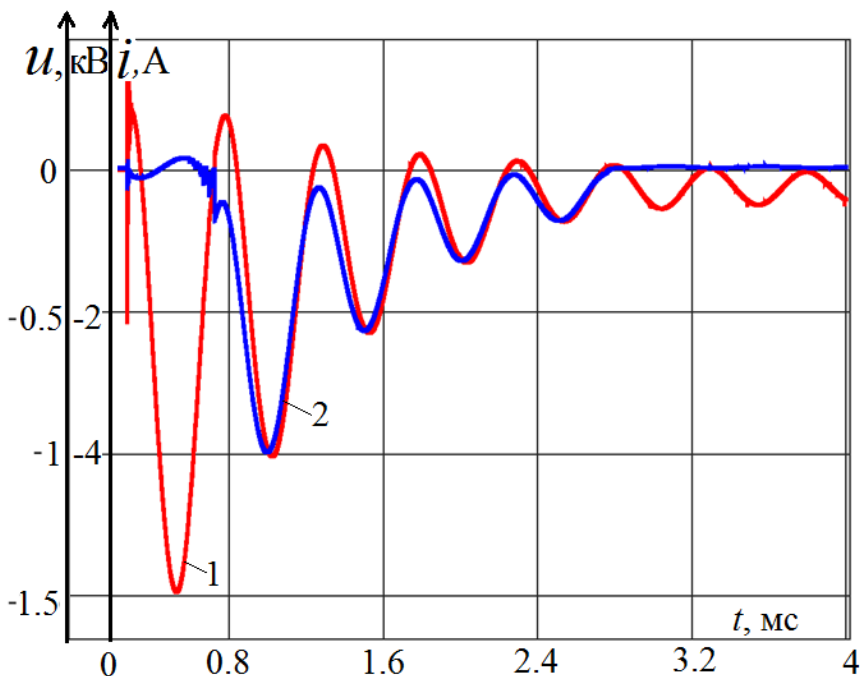


Рис.10 - Напряжение на выходе делителя напряжения (1), ($U_{max}=1.47$ кВ); напряжение на токовом шунте ИРЗ (2)

исключения кратковременных дуговых перенапряжений до минимально возможных значений $\sim 1.8 U_{\phi.m}$. Принцип работы устройства заключается в подключении резко нелинейного варистора (ОПН) к фазам ЭС в момент возникновения однофазного дугового замыкания, т.е. в момент пробоя фазной изоляции. Схема устройства ГО (УГО), включенного в ЭС, показана на рис.11. Конструктивно устройство ГО во многом повторяет устройство ИРЗ.

При автономной работе УГО в ЭС с изолированной нейтралью избыточный заряд с нейтрали ЭС принципиально не сбрасывается до нуля (в отличие от резистивного заземления), поскольку фазные ОПН закрываются после выполнения условия $u_{\phi} < U_{ост}$ (фазное

Пятая глава посвящена теории глубокого ограничения (ГО) дуговых перенапряжений и разработке соответствующих устройств. Предложен новый способ глубокого ограничения дуговых перенапряжений в электрических сетях среднего класса напряжения с неэффективным заземлением нейтрали. Особенность способа заключается в практически полном

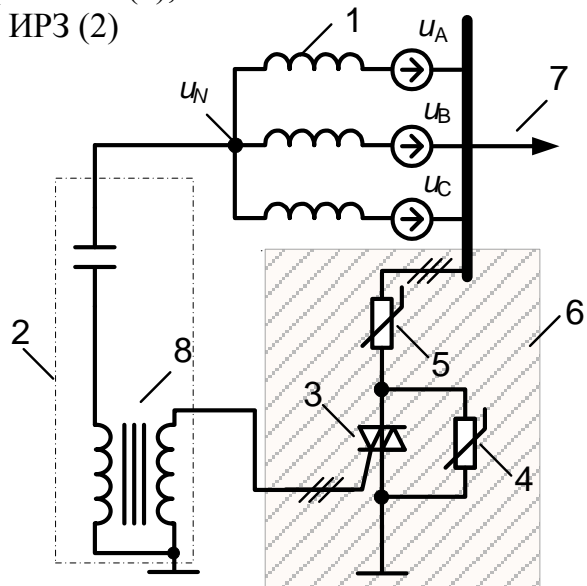


Рис.11 - УГО (в выделенном квадрате); 1- нейтраль трансформатора, 2 – ДЗЦ, 3 – симисторные ключи, 4 – защитные варисторы, 5 – фазные ОПН, 6 – УГО, 7 – к сети, 8 – запускающий трансформатор

напряжение меньше остающегося напряжения ОПН $U_{ост}$). Поэтому неограниченные дуговые перенапряжения U_{max} , приложенные к защитным варисторам и ОПН, оказываются завышенными, что ведет к дополнительному энерговыделению и, как следствие, к потенциальному сокращению времени работы УГО.

Энергия, поглощаемой ОПН $E_{опн}$, при автономной работе УГО оценивается как:

$$E_{опн} \cong \frac{C_{\phi} + 2C_{м\phi}}{2} (U_{max}^2 - U_{ост}^2).$$

В качестве примера выполнен расчет энергии, выделенной в фазном ОПН в ЭС 10 кВ с ЕТЗЗ $I_C=20$ А при единичном зажигании дуги. Она составила 1149 Дж. Время работы ОПН (при условии зажигания дуги через каждый полупериод промышленной частоты) составило 0.36 сек, т.е. сильно ограничено. Результаты этого расчета хорошо согласуются с разработанной компьютерной моделью, включающей в себя модель фазного ОПН, составного симисторного ключа и защитной варисторной цепи УГО.

Энергетически разгрузить фазные ОПН (5 – на рис. 11) и увеличить время работы УГО (приблизительно в 3.7 раза) возможно путем совместного использования УГО и ИРЗ. Применение ИРЗ позволяет уменьшить максимальные кратности неограниченных перенапряжений U_{max} , уменьшить энергию, выделяемую в фазных ОПН (и защитных варисторах). Такое совместное применение устройств позволяет значительно упростить схему управления УГО, т.к. сигнал отпирания ключей УГО может синхронизироваться посредством ДЗЦ и устройства управления ИРЗ. В системе управления УГО должна быть задана необходимая длительность отпирающего импульса ($t_{и}$), обеспечивающего надежное открытие составного симисторного ключа: значение $t_{и}$ должно быть соизмеримо или превышать полупериод свободных перезарядных колебаний в ЭС, т.е. $t_{и} \geq \pi/\beta_1$.

Для УГО выполнен обоснованный выбор защитных варисторов. При единичном воздействии перенапряжения с максимальной кратностью (3.1-3.3) $U_{ф.м}$, максимальная энергия, рассеиваемая в варисторе в самом неблагоприятном режиме включения последнего симистора с большой временной задержкой, приблизительно в 100 раз меньше максимально допустимого значения, чем обеспечивается их надежная работа. Для повышения надежности УГО рекомендуется для защиты «медленных» симисторов применять варисторы повышенной энергоемкости/мощности. Принципиально, существует возможность выхода из строя защитной варисторной цепи от перегрева при длительных ОДЗ и отсутствии сигнала управления на УГО. Для защиты симисторного ключа, в частности, варисторной цепи целесообразно применять так называемый составной ОПН. Его нижнее плечо шунтирует высоковольтный ключ и защитные варисторы, а верхнее обеспечивает глубокий уровень ограничения дуговых перенапряжений (т.е. является «фазным» ОПН). Так, например, если принять уровень ограничения составного ОПН $3,3U_{ф.м}$, то

верхнее плечо составного ОПН рассчитывается на уровень ограничения перенапряжений равный $1,8U_{ф.м.}$, а нижнее плечо – на $1,5U_{ф.м.}$.

Применение устройства глубокого ограничения позволяет заметно повысить надежность электрооборудования сетей с вращающимися электрическими машинами (гидро- и турбогенераторами, крупными электрическими двигателями). Изготовлен экспериментальный высоковольтный прототип 3-х фазного симисторного высоковольтного ключа, который подключается к фазным ОПН. Ведется сборка и испытание устройства.

Конструкция ключа, используемого для подключения ОПН к контуру заземления, идентична конструкции ключа, применяемого в ИРЗ (рис. 12). Отличием является установка термодатчика и термореле, отключающего ОПН при достижении им критической температуры.



Рис.12 - Устройство глубокого ограничения дуговых перенапряжений на этапе сборки

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных в диссертации теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие основные рекомендации и выводы.

1. Сопоставление существующих способов заземления нейтрали показало, что официально разрешенное в России приблизительно с 2000 г. высокоомное резистивное заземление, несмотря на эффективность ограничения дуговых перенапряжений, не получило широкого распространения из-за основного недостатка – повышенного тока ОЗЗ. В работе показано, что применение нового импульсного резистивного способа заземления нейтрали позволяет минимизировать негативное влияние активной составляющей тока замыкания на землю и тем самым расширить область применения этого способа заземления.

2. Разработано не имеющее аналогов устройство импульсного резистивного заземления нейтрали, подключающее нейтрале-заземляющий резистор к контуру заземления станции/подстанции только при неустойчивых однофазных дуговых замыканиях, когда $du_N/dt_{ОДЗ} > du_N/dt_{УОЗЗ}$. ИРЗ сохраняет способность эффективного снижения дуговых перенапряжений и устраняет недостатки постоянного резистивного заземления.

3. ИРЗ заметно уменьшает энерговыделение в нейтрале-заземляющем резисторе по отношению к способу постоянного резистивного заземления, снижая технологические потери и требование к мощности самого резистора. Уменьшение тока замыкания в установившемся режиме замыкания

способствует снижению его разрушающего воздействия на изоляцию и провода, а также повышает электробезопасность и экологичность ЭС.

4. Производная напряжения в нейтрали ЭС (du_N/dt), зависящая от ее параметров (мощности источника, нагрузки, протяженности линий) и в значительной степени от удаленности замыкания от центра питания, для подавляющего большинства ЭС достаточна для уверенного запуска устройств ИРЗ.

5. Разработаны методики приближенной оценки величины производной напряжения на нейтрали ЭС при замыканиях на землю. Импульс напряжения НП на нейтрали ЭС на первом высокочастотном этапе замыкания рассчитывается посредством определения его затухания на подстанциях и расчета увеличения длительности его фронта в процессе распространения импульса к центру питания от места замыкания; далее высокочастотная составляющая производной du_N/dt рассчитывается решением несложных дифференциальных уравнений для контура второго порядка, включающего ДЗЦ. Низкочастотная составляющая производной на втором этапе замыкания рассчитывается на основе несложно определяемых частоты и амплитуды свободных перезарядных колебаний. Оценка возможности работы ИРЗ оценивается по обоим производным.

6. Разработана и изготовлена низковольтная физическая модель сети с различными способами заземления нейтрали, позволившая апробировать импульсно резистивный способ заземления. В модель сети заложены классические теории горения перемежающейся дуги по Петерсену и Петерсу и Слепяну. Эта модель используется в учебном процессе при подготовке магистров по специальности «Техника высоких напряжений».

7. Разработаны полноценные компьютерные модели распределительных электрических сетей с импульсно резистивным заземлением, позволяющие исследовать переходные процессы, происходящие как в ЭС, так и самих устройствах ИРЗ. Лабораторные эксперименты подтверждают адекватность поведения всех элементов модели: полупроводниковых ключей, нелинейных элементов (варисторов, запускающего трансформатора и пр.).

8. Предложен новый способ глубокого ограничения дуговых перенапряжений в распределительных сетях среднего класса напряжения с неэффективным заземлением нейтрали. Работа устройств глубокого ограничения ДП рекомендуется одновременно с устройствами ИРЗ, устанавливаемыми в ЭС. Применение таких устройств позволяет кратковременно и контролируемо ограничивать ДП вплоть до уровня $1.8U_{ф.м.}$ В устройстве глубокого ограничения целесообразно применять предложенный составной ОПН.

9. В системе управления устройством глубокого ограничения должна обеспечиваться минимальная длительность отпирающего импульса ($t_{отп}$), обеспечивающего надежное открытие составного симисторного ключа: значение $t_{отп}$ должно быть соизмеримо или превышать полупериод свободных перезарядных колебаний, т.е. $t_{отп} \geq \pi/\beta_1$.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

Публикации в журналах из Перечня ВАК РФ и приравненных к ним изданиях:

1. Качесов, В. Е. Импульсно-резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях [Текст] / В. Е. Качесов, Р. А. Финашин // Электричество. – 2017. – № 12. – С. 12–18.
2. Качесов В. Е. Импульсно-резистивный способ заземления нейтрали трехфазной электрической сети и физическая модель, его реализующая [Текст] / В. Е. Качесов, Р. А. Финашин // Электроэнергия. Передача и распределение. - №1(58) - 2020 - С.90-95.

В патентах на изобретение и полезную модель:

3. Патент 2640033 РФ, МПК Н 02 Н 9/00. Устройство заземления нейтрали трехфазной электрической сети/ В. Е. Качесов, Р. А. Финашин ; № 2015155475 ; заяв. 23.12.2015 ; опубл. 26.12.2017, Бюл. № 36.
4. Патент на полезную модель № 194369 РФ, МПК Н 02 Н 3/20. Устройство заземления нейтрали трехфазной электрической сети/ В. Е. Качесов, Р. А. Финашин ; № 2019118852 ; заяв. 17.06.2019 ; опубл. 09.12.2019, Бюл. № 34.

Публикации в изданиях, индексируемых базами SCOPUS:

5. Kachesov, V. E. Pulse-resistive neutral grounding of three-phase power network and its physical model [Текст] / V. E. Kachesov, R. A. Finashin, L. I. Tolstobrova // Actual problems of electronicinstrumentengineering (APEIE–2018). В 8 т. : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 2. – С. 259–263.

Публикации в научно-технических журналах, трудах Всероссийских и Международных конференций:

6. Качесов, В. Е. Исследование разрядных характеристик управляемых вакуумных разрядников [Текст] / В. Е. Качесов, А. Е. Петухов, Р. А. Финашин // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи : материалы 2 Рос. молодеж. науч. шк.-конф., Томск, 29–31 окт. 2014 г. – С. 259–261.
7. Качесов В. Е. Исследование управляемых вакуумных разрядников для импульсного резистивного заземления нейтрали [Текст] / В. Е. Качесов, А. Е. Петухов , Р. А. Финашин // Оперативное управление в электроэнергетике. Подготовка персонала и поддержание его квалификации. - 2015. - № 3. - С. 28-32.

8. Качесов, В. Е. Импульсно-резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях [Текст] / В. Е. Качесов, Р. А. Финашин // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии : материалы междунар. науч.-техн. конф. (18 Бенардосовские чтения), Иваново, 27–29 мая 2015 г. Т. 1. Электроэнергетика. – Иваново : ИГЭУ, 2015. – С. 90–93.
9. Финашин, Р. А. Модель заземления нейтрали для распределительных сетей [Текст] / Р. А. Финашин ; науч. рук. В. Е. Качесов // М атериалы 54 международной научной студенческой конференции (МНСК-2016). Энергетика = Proceedings of the 54 international students scientific conference (ISSC-2016). Energetics, Новосибирск, 16–20 апр. 2016 г. – Новосибирск : РИЦ НГУ, 2016. – С. 53.
10. Finashin, R. A. Economic effect of implementing a new method of neutral grounding in medium voltage distribution networks = Экономический эффект от внедрения нового способа заземления нейтрали в распределительных сетях среднего напряжения [Текст] / R. A. Finashin ; sci. ed. V. J. Kachesov // Актуальные проблемы современного общества = Urgent Problems of Modern Society : сб. материалов 13 междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Новосибирск, 17–18 нояб. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 259–263.
11. Финашин, Р. А. Устройство импульсного резистивного заземления сетей 6-35 кВ [Текст] / Р. А. Финашин ; науч. рук. В. Е. Качесов // Энергия–2018 : 13 междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Иваново, 3–5 апр. 2018 г. : материалы конф. В 6 т. Т. 3. Электроэнергетика. – Иваново : ИГЭУ, 2018. – С. 154.
12. Финашин, Р. А. Низковольтная лабораторная модель сети 6–35 кВ [Текст] / Р. А. Финашин ; науч. рук. В. Е. Качесов // Энергия–2018 : 13 междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Иваново, 3–5 апр. 2018 г. : материалы конф. В 6 т. Т. 3. Электроэнергетика. – Иваново : ИГЭУ, 2018. – С. 155.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60x84 1/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № «556». Подписано в печать 22.04.2020 г.