

*На правах рукописи*



ШИРКОВЕЦ Андрей Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ  
С НЕЭФФЕКТИВНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ**

Специальность: 05.14.12 – Техника высоких напряжений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Кадомская Кира Пантелеймоновна**

Официальные оппоненты: **Халилов Фирудин Халилович**  
доктор технических наук, профессор,  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, профессор кафедры техники высоких напряжений, электроизоляционной и кабельной техники

**Арбузов Роман Сергеевич**  
кандидат технических наук, директор филиала ОАО «Электросетьсервис ЕНЭС» - Новосибирская СПБ

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

Защита диссертации состоится « 19 » декабря 2013 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Тимофеев Иван Петрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Электромагнитные процессы, сопровождающие возникновение и развитие однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в электрических сетях, характеризуются сочетанием переходных и установившихся режимов горения заземляющей дуги. Параметры таких режимов во многом определяются конструкцией сети и способом заземления нейтрали. Для кабельных сетей класса 35 кВ и ниже используется так называемое неэффективное заземление нейтрали, когда напряжения на неповрежденных фазах при ОЗЗ превышают 1,4 (определяемый в ПУЭ коэффициент замыкания на землю) от фазного напряжения сети в нормальном режиме. В эту область включены и широко применяемые с начала 2000-х гг. режимы с активным и активно-индуктивным, или комбинированным, заземлением нейтрали (КЗН).

Однофазные пробой изоляции силовых кабелей на землю в значительной мере определяют показатели надежности всей электрически связанной сети, поскольку в 70 – 90% случаев неотключенные ОЗЗ служат причиной междофазных повреждений изоляции и аварийных отключений. Поэтому актуальной задачей является анализ технологических нарушений режимов эксплуатации кабельных линий (КЛ), длительно эксплуатируемых в схемах электроснабжения промышленных предприятий и объектов городской инфраструктуры.

Исследование замыканий на землю в кабельных сетях сопряжено с отсутствием полноценных алгоритмов и моделей их развития, а также ограниченностью количественной оценки параметров ОЗЗ. В. Петерсеном (1916 г.) и Петерсом и Слепяном (1923 г.) были разработаны гипотезы (теории), объясняющие физический механизм возникновения дуговых перенапряжений при ОЗЗ и отличающиеся гипотезами гашения заземляющей дуги. Экспериментальное исследование и совершенствование способов оценки перенапряжений при дуговых ОЗЗ позволило Ч.М. Джуварлы и Н.Н. Белякову (1957 г.) существенно развить эти теории. Однако последние справедливы для случаев горения заземляющей дуги преимущественно в воздушных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью. Поэтому их использование при расчетах электромагнитных процессов ОЗЗ в изоляции кабельных линий (КЛ) предполагает введение ряда относительно грубых допущений, которые могут привести к ошибкам в определении энергоемкости и термической стойкости оборудования при выборе устройств защиты от дуговых перенапряжений. Задача осложняется тем, что характер и результат горения однофазной дуги в силовом кабеле существенно зависит также от вида и состояния поврежденного диэлектрика: бумажно-масляной пропитанной изоляции (БМПИ) или изоляции из сшитого полиэтилена (СПЭ).

Исследованию переходных процессов при замыканиях на землю и их последствий в электрических сетях различного назначения, а также разработке релейных защит от ОЗЗ посвящены работы Р.А. Вайнштейна, Ф.Х. Халилова, К.П. Кадомской, В.Г. Гольдштейна, В.А. Шуина, В.К. Обабкова, Л.И. Сарина, В.В. Кискачи, А.И. Шалина, Ю.В. Целебровского, С.Л. Кужекова, В.Ф. Сивокобыленко, Г.А. Евдокунина и других ученых.

В настоящее время в электрических сетях наблюдается тенденция к повсеместному внедрению силовых кабелей с изоляцией из СПЭ. Процесс развития пробоя в полимерах является достаточно сложным и тесно связан со снижением электрической прочности (ЭП) изоляции под воздействием электрических и водных триингов. Исследованию этих вопросов посвящены работы М.Ю. Шувалова, В.Н. Овсиенко, Ю.В. Образцова (ВНИИКП), С.М. Лебедева и В.Я. Ушакова, В.А. Канискина и А.И. Таджибаева, Ю.Н. Вершинина, а также зарубежных исследователей *L. Dissado, G. Bahder, G. Montanari, B. Bernstein* и др. Триинги в СПЭ-изоляции, независимо от их структуры и физической природы, представляют серьезную опасность для кабеля, поскольку участвуют в формировании канала пробоя диэлектрика при ОЗЗ.

Подробного анализа развития повреждения в разных видах изоляции силового кабеля при его однофазном пробое на землю до настоящего времени не проводилось. Условия дугового пробоя в БМПИ кабеля, проанализированные *H. Ohnishi, H. Uraho, S. Hasergana*, дополняют результаты, полученные Ф.А. Лихачевым и Л.Е. Дударевым, но не содержат энергетических характеристик заземляющей дуги и оценки ее динамического сопротивления. Результаты исследований процесса горения дуги, стабилизированной испаряющимся материалом стенок дугового канала в полимере, проведенные *L. Nimeyer* и *C. Ruchti* (1978), содержат количественные модели на основе уравнений баланса массы, момента и энергии, однако они справедливы для высокоамперных дуг при горении в узких каналах твердых материалов.

В связи с изложенным актуальность диссертационной работы определяют аналитические и экспериментальные исследования электромагнитных процессов ОЗЗ в кабельных сетях с неэффективным заземлением нейтрали, включающие анализ параметров переходных процессов и разработку алгоритмов развития дуговых ОЗЗ в силовых кабелях с различными типами изоляции.

**Целью работы** является натурное и компьютерное моделирование электромагнитных процессов при однофазном дуговом замыкании на землю в кабелях с БМПИ и СПЭ-изоляцией и разработка алгоритмов и гипотез его развития для совершенствования способов защиты силовых КЛ.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие **задачи**:

- выполнить аналитическое исследование параметров дуговых замыканий на землю при однофазных повреждениях изоляции силовых кабелей;
- реализовать методический подход к комплексному статистическому анализу параметров осциллографированных напряжений и тока дугового замыкания на землю в БМПИ силового кабеля; проанализировать и статистически обработать результаты мониторинга перенапряжений;
- разработать компьютерную модель электрической сети 10 кВ с КЛ большой протяженности; оценить изменение сопротивления в месте однофазного замыкания на основе измеренных токов высших гармоник в цепи замыкания;
- разработать и экспериментально проверить алгоритмы (механизмы) развития дугового замыкания на землю в БМПИ и СПЭ-изоляции кабелей при учёте нелинейного сопротивления дугового канала;

- предложить методические и практические мероприятия по повышению надежности эксплуатации КЛ с СПЭ-изоляцией.

**Методы исследования.** Для достижения поставленных задач были использованы методы компьютерного моделирования на основе теории электрических цепей и электромагнитных переходных процессов; метод натурального эксперимента с организацией искусственных ОЗЗ в эксплуатируемой кабельной сети; методы цифровой регистрации, обработки и гармонического анализа сигналов; методы теории вероятностей и математической статистики.

**Научная новизна основных положений и результатов работы:**

- получены экспериментальные результаты, показывающие, что погасание однофазной дуги в изоляции кабеля происходит при первом или последующем переходах высокочастотного тока (ВЧ) дуги через нуль. При этом возникновение повторных пробоев определяется не только соревнованием скоростей восстанавливающейся электрической прочности (ВЭП) и переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН), но и скоростью перехода ВЧ тока дуги через нуль.

- реализован принцип комплексной статистической обработки и впервые получены статистические оценки и корреляционные связи скоростных, амплитудных и временных параметров перемежающегося дугового замыкания в бумажно-пропитанной изоляции силового кабеля;

- выявлен эффект существенного снижения длительности горения однофазной дуги после первичного пробоя на землю фазы кабеля с БМПИ, наблюдаемый при условии введения определенной активной составляющей тока замыкания, синфазной с напряжением на дуговом промежутке. Это позволяет снизить количество аварийных отключений КЛ с ослабленной изоляцией за счет оптимизации режима заземления нейтрали;

- впервые разработаны и экспериментально проверены алгоритмы (механизмы) развития однофазного дугового замыкания на землю в БМПИ и изоляции из СПЭ силовых кабелей, предложена графическая интерпретация алгоритмов на основе нелинейного сопротивления канала пробоя.

**Личный вклад соискателя заключается в** формулировке цели и задач работы; участии в организации и выполнении экспериментов в реальных кабельных сетях; сборе и обработке данных мониторинга перенапряжений; разработке алгоритмов обработки натуральных осциллограмм; корректировке математических моделей; разработке и обосновании алгоритмов развития ОЗЗ в изоляции силовых КЛ; формировании технических требований и алгоритма работы ВЧ распределенной системы сбора данных.

**Практическая значимость и реализация результатов работы:**

- предложенные алгоритмы и исследованные закономерности развития ОЗЗ в кабельных сетях реализованы в высокочастотной системе регистрации аварийных событий и переходных процессов СПЕКТР 1.01, разработанной ООО «Болид». Данные устройства установлены и эксплуатируются в кабельной сети 10 кВ филиала ОАО «МРСК Северо-Запада» «Архэнерго», г. Архангельск. Акт

об использовании результатов включен в текст диссертационной работы в виде Приложения.

- разработанные практические и методические мероприятия по повышению надежности эксплуатации силовых КЛ 6-35 кВ с СПЭ-изоляцией реализованы в форме разделов стандарта «Руководящие указания по выбору, сооружению и технологии эксплуатации кабельных линий напряжением 6 – 110 кВ на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена», который введен в действие приказом генерального директора ОАО «Ленэнерго» в 2012 г. Заключение об использовании результатов также включено в текст диссертационной работы в виде Приложения.

**Достоверность и обоснованность** результатов работы обеспечивается применением теории электромагнитных переходных процессов, теории высоковольтной изоляции, использованием апробированной измерительной аппаратуры и математического аппарата, качественным согласием результатов аналитических исследований и натурных экспериментов.

**Апробация работы и публикации.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» Новосибирского государственного технического университета, IV и V Всероссийских научно-технических конференциях «Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ» (г. Новосибирск, 2006, 2008); Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы эксплуатации городских кабельных сетей и сетей промышленных предприятий» (г. Свалява, Украина, 2007); II Международной научно-практической конференции «Кабельная техника современного уровня и изоляция» (г. Харьков, Украина, 2008); XIII Всероссийской научно-технической конференции Краснодарского краевого отделения РНТО энергетиков и электротехников «Пути повышения надежности, эффективности и безопасности энергетического производства» (с. Дивноморское, 2010); Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем» – ЭНЕРГО-2010 (г. Москва, 2010); Семинаре №24 «Электрификация и энергосбережение в горной промышленности» научного симпозиума «Неделя горняка-2011» (Москва, 2011); III Международной молодежной конференции инженеров-энергетиков IYCE 2011 (г. Лейрия, Португалия, 2011), Восьмой Международной конференции «Качество электроэнергии и надежность электроснабжения» PQ-2012 (г. Тарту, Эстония, 2012), Международной конференции и выставке Energy Mongolia'2013 (г. Улан-Батор, Монголия, 2013), II Международной конференции «Электроэнергетическое оборудование – Коммутационные технологии» ICERE-ST 2013 (г. Мацуэ, Япония, 2013).

Результаты работы использованы при выполнении НИР «Исследование и разработка мер ограничения внутренних перенапряжений в сетях 6-35 кВ ОАО «МРСК Волги», характеризующихся высокими уровнями емкостных токов и большими расстройками компенсации при замыканиях на землю», НИР «Ком-

плексные исследования распределительной сети 10 кВ ПС-75 и ПС-155 филиала ОАО «Ленэнерго» – Пригородные электрические сети».

По теме диссертации в научно-технической литературе опубликованы 23 работы, в том числе 5 научных статей в рецензируемых изданиях; 1 статья в материалах Совещания главных энергетиков ОАО «Газпром», 6 статей в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций; 11 статей в специализированных периодических изданиях. В автореферате приведен список из 15 наиболее значимых работ по теме диссертации.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- погасание однофазной дуги в БМПИ кабеля происходит при переходе свободной составляющей тока замыкания через нулевое значение; амплитудные, скоростные и временные параметры перемежающегося дугового замыкания в изоляции имеют сложную корреляционную связь;
- улучшить условия погасания однофазной дуги после первичного пробоя кабельной изоляции можно при дополнении тока замыкания активной составляющей, синфазной с напряжением на дуговом промежутке и не влияющей на электрический угол пробоя (момент зажигания дуги);
- алгоритмы (механизмы) и графическая интерпретация развития однофазного дугового замыкания в БМПИ и СПЭ-изоляции силовых кабелей, отражающие снижение напряжения пробоя и сопротивления дугового канала; статистическая оценка энергетических характеристик заземляющей дуги и ее динамического сопротивления;
- экспериментальная проверка разработанных алгоритмов и особенностей развития ОЗЗ в кабельных сетях, результаты внедрения распределенной высокочастотной системы сбора данных.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, трех приложений и списка использованных источников из 112 наименований. Работа изложена на 224 страницах основного текста и приложений на 31 странице, включает 69 рисунков и 37 таблиц.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** представлена характеристика диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость, обусловленные необходимостью исследования и моделирования замыканий на землю в кабельных сетях для выбора адекватных средств защиты от перенапряжений и повышения надежности эксплуатации.

**Первый раздел** посвящен задаче определения амплитудных, временных и частотных параметров замыканий на землю и диапазонов их изменения с учетом особенностей развития соответствующих переходных процессов в кабельных сетях.

Сложность разработки обоснованных алгоритмов развития дуговых замыканий в изоляции силовых кабелей связана с наличием широкого ряда влияющих факторов, таких как соотношение активной и реактивной составляющих тока замыкания на землю, сопротивление цепи замыкания, время горения дуги и длительность бестоковых пауз и т.д. Поэтому механизм возникновения мак-

симальных перенапряжений в соответствии с существующими теориями не характеризует реальный электромагнитный процесс развития ОЗЗ в изоляции силового кабеля. Кроме амплитуды дуговых перенапряжений, следует анализировать частотные и временные параметры замыкания. Комплекс расчетов частот переходного процесса в контуре ОЗЗ в кабельной сети подтвердил необходимость формирования математической модели (рисунок 1, где  $L_{Ш}$  и  $L_T$  – индуктивности ошиновки и питающего трансформатора,  $C_{Ф}$  и  $C_{ФФ}$  – фазная и междофазная емкости сети), учитывающей протекание трех этапов процесса. Для первого этапа характерно наличие составляющих двух частот  $f_1$  и  $f_2$ , которые определяются эквивалентной индуктивностью ошиновки, через которую происходит перезаряд емкостей, и активным сопротивлением дуги в диапазоне  $10^{-1} - 10^3$  Ом.

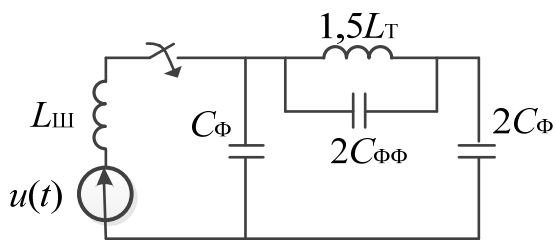


Рисунок 1 – Эквивалентная схема для определения частот на разных этапах переходного процесса при дуговом ОЗЗ

ВЧ переходные процессы, связанные с разрядом ёмкости повреждённой фазы, характеризуются для сети с токами  $I_C = 5 - 200$  А частотами  $f_1 \leq 5,25 - 33,2$  кГц, а среднечастотные, обусловленные перезарядом ёмкостей через индуктивность источника –  $f_2 = 3,7 - 23,5$  кГц. Низкочастотный процесс, возникающий за счет изменения напряжения на нейтрали, определяется

в том числе индуктивностью (мощностью  $S_T$ ) источника питания и для  $I_C = 5$  А его частота составляет  $f_3 = 1,51$  кГц для  $S_T = 10$  МВА,  $f_3 = 4,47$  кГц для  $S_T = 80$  МВА, для  $I_C = 200$  А  $f_3 = 238$  Гц для  $S_T = 10$  МВА,  $f_3 = 706$  Гц для  $S_T = 80$  МВА. В сетях с трехжильными кабелями с БМПИ частоты  $f_2$  и  $f_3$  ниже на 11,3%, относительно соответствующих значений в сети с СПЭ-кабелями. Для правильной оценки амплитуды и частоты гармоник  $f_1$  и  $f_2$  и корректной оценки наибольших перенапряжений необходимо учитывать распределенность параметров ошиновки и подходящих к шинам рассматриваемой сети воздушных и кабельных линий, имея в виду, что вероятность возникновения уровней перенапряжений  $K_U \geq 2,80$  не превышает 0,05. Анализ нескольких сот натурных осциллограмм позволил заключить, что погасание однофазной дуги происходит при переходах свободной составляющей тока дуги частотой примерно от 0,4 – 0,6 кГц до 4 – 6 кГц через нулевое значение.

Результаты регистрации и сопоставление их с расчетами показывают, что соотношение активного и емкостного токов замыкания на землю  $I_R/I_C \geq 3,5 - 4,0$  обеспечит устойчивое горение дуги при ОЗЗ в кабеле с БМПИ. Для кабеля с СПЭ-изоляцией в целях определения активного тока, гарантирующего перевод дуги в устойчивую фазу горения за  $t_{DUG} = 0,1 - 0,5$  с и селективное срабатывание простых токовых защит от ОЗЗ, используется выражение  $I_R/I_C = 2,5 - 4,0$ .

Исходя из практики выбора резисторов для заземления нейтрали эксплуатируемых и проектируемых кабельных сетей, можно констатировать, что этому условию в сетях среднего напряжения соответствуют номинальные сопротивления 10 – 200 Ом (время работы не менее 5 с) с активным током не более 400 – 600 А из условия термической стойкости оборудования.



При  $I_R/I_C < 0,6$  влияние активного сопротивления в нейтрали на возможность самопогасания дуги оказалось малозаметным. Существенное снижение вероятности повторных пробоев за счет самопогасания дуги в кабеле с БМПИ наиболее вероятно при  $I_R/I_C = 0,6 - 1,2$ . Пропорционально значению активного сопротивления в нейтрали сети повышается эквивалентное сопротивление цепи замыкания, что приводит к затуханию переходного процесса при меньшем количестве переходов тока дуги через ноль. Расчеты также показали, что рост доли активного тока в 4 раза (от  $I_R = I_C$  до  $I_R = 4I_C$ ) приводит к возрастанию степени демпфирования свободных колебаний на 23,5%, а по сравнению с изолированной нейтралью ( $I_R/I_C = 0$ ) – на 34%. Влияние относительного активного тока  $I_R/I_C$  на частоту свободных колебаний  $f$  с ростом последней снижается: при  $f = 2$  кГц это влияние становится слабозаметным, а при  $f \geq 5$  кГц практически полностью нивелируется.

Исследование временных параметров дугового ОЗЗ в кабеле показало, что широкий диапазон значений времени горения дуги  $t_{DUG}$  и длительности бестоковых пауз  $\Delta t$  хорошо отражает возможность существования различных режимов ее горения. Перемежающиеся дуги характеризуются значениями  $\Delta t = 10 - 40$  мс, прерывистые –  $\Delta t = 160 - 200$  мс и более. В реальных условиях эксплуатации кабельных сетей наблюдается большой разброс  $\Delta t$ , обусловленный случайностью момента пробоя. Длительность горения дуги  $t_{DUG}$  в единичном пробое также можно рассматривать как характерный признак, отличающийся для перемежающихся/ прерывистых ( $t_{DUG} = 1 - 10$  мс) и устойчивых ( $t_{DUG} > 20$  мс) дуговых ОЗЗ.

Горение дуги в кабельной изоляции происходит в узком канале пробоя, который может расширяться за счет испарения материала стенок канала. Скорость поступления в столб дуги продуктов испарения повышается с ростом разрядного тока, достигая пика при  $t_{DUG} \gg 20$  мс. Дуга в изоляции силового кабеля с БМПИ может гореть более 10 мин, характерными для режима устойчивого горения заземляющей дуги являются значения  $t_{DUG} \leq (1 - 2)$  с. В СПЭ-кабелях  $t_{DUG} \leq (1 - 2)$  мин (обычно до 30 с): по истечении этого времени дуга может прожечь внешнюю оболочку кабеля, повредив проложенные рядом фазы КЛ.

**Во втором разделе** представлены результаты комплексной статистической обработки и анализа результатов натуральных испытаний, а также длительной регистрации (мониторинга) переходных и аварийных процессов в кабельных сетях среднего напряжения.

На основе натуральных осциллограмм, полученных при использовании схемы измерений с искусственным повреждением изоляции силового кабеля (рисунк 2), был выполнен статистический анализ амплитудных, скоростных и временных параметров напряжений и тока дуги ( $t_{DUG}$ ;  $\Delta t$ ;  $K_U$ ; скорости перехода тока через ноль  $di_{DUG}/dt$ ; скорости ПВН  $du_{ВОССТ}/dt$ ; амплитуды напряжения на нейтрали  $u_{NMAX}$ ; напряжения повторного пробоя  $u_{ПР}$ ) в режиме последовательных импульсных пробоев фазы на землю (перемежающаяся дуга) в силовом кабеле с БМПИ. Реализован принцип комплексной статистической обработки, включающий в данном случае проверку гипотез о виде закона распределения, проверку нормальности распределения по критерию Д'Агостино, проверку вы-

борок случайных величин на наличие аномальных выбросов с использованием критериев Роснера и Смирнова-Граббса, определение статистических характеристик и доверительных диапазонов, проверку гипотезы о наличии парной корреляционной связи с вычислением коэффициентов линейной парной регрессии (критерий Фишера), а также гипотезы о наличии частных и множественных корреляций между параметрами дугового ОЗЗ в кабеле. В качестве испытываемых кабелей, в которых с помощью специального прокалывающего устройства и искрового промежутка инициировался дуговой пробой, применялись отрезки кабеля ААШВ-10 (3х70) длиной до 5 м со снятой внешней оболочкой.

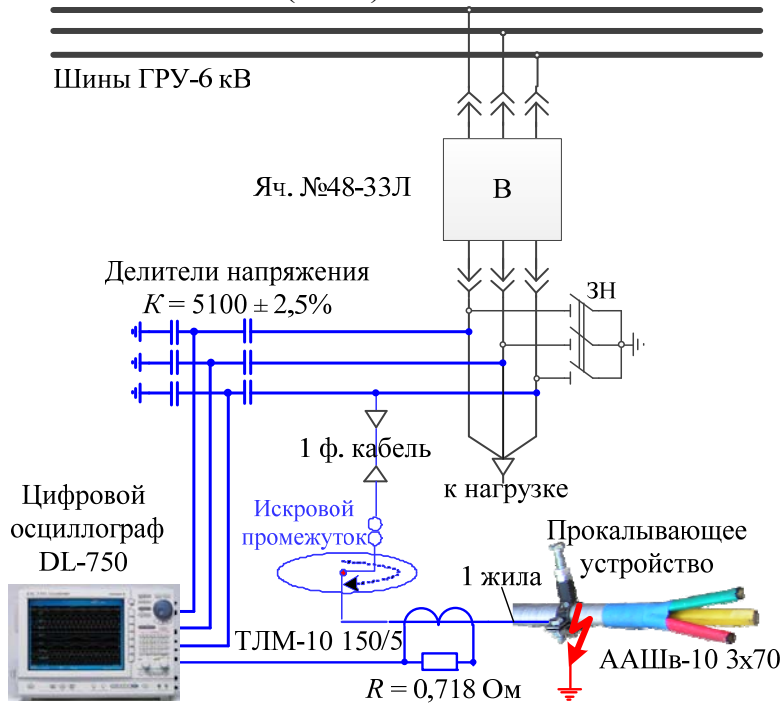


Рисунок 2 – Схема организации эксперимента в кабельной сети 6 кВ с инициированием дугового замыкания в кабеле с БМПИ

В течение опыта с общей длительностью горения заземляющей дуги 5,05 с было зафиксировано 63 цикла «зажигание-гашение» дуги без ее перехода в режим непрерывного горения (рисунок 3).

Анализ статистических характеристик параметров ОЗЗ в этом режиме показал, что остаточная ЭП в месте искусственного повреждения БМПИ увеличивается за счет подтекающего кабельного масла, гашение тока дуги происходит менее чем за 8 мс с отклонением  $\sigma[t_{DUG}] < 1,1$  мс. Предельная скорость перехода ВЧ тока

дуги через нуль перед погасанием составляет  $di_{DUG}/dt = 240 - 800$  А/мс и не зависит от времени горения дуги. Длительность бестоковых пауз подвержена большому разбросу: при  $M[\Delta t] = 73,2$  мс  $\sigma[\Delta t] = 23,5$  мс, что связано с нестабильностью скорости ВЭП. С учетом малых скоростей восстановления напряжения на поврежденной фазе  $du_{ВОССТ}/dt = 21 - 52$  В/мс и наличия повторных пробоев при  $u_{ПРМАХ} \leq 0,85u_{ФМАХ}$  ( $M[u_{ПР}] = 0,62u_{ФМАХ}$ ) предлагается на основании проведенных исследований при моделировании принимать скорость ВЭП на уровне 0,1 – 0,2 кВ/мс.

С уровнем значимости  $q = 0,05$  была подтверждена стохастическая связь в парах « $K_U - u_{NМАХ}$ », « $K_U - u_{ПР}$ », « $\Delta t - u_{ПР}$ », « $du_{ВОССТ}/dt - u_{ПР}$ ». Расчеты показали, что для этих пар случайных величин уверенность в значимости корреляции и коэффициентов линейной регрессии крайне высока: проверяемая гипотеза не отклоняется при доверительной вероятности  $p_D = 0,99$ . Корреляция и уравнение линейной регрессии для выборок  $di_{DUG}/dt - du_{ВОССТ}/dt$  становятся статистически значимы уже при  $q = 0,053$  ( $r = 0,2479 > r_{q=0,053} = 0,2469$ ). Это свидетельствует в пользу наличия между ними корреляционной связи с незначительным снижением

ем надежности решения с 0,950 до 0,947. Оценка значимости частной и множественной корреляций между наблюдаемыми случайными величинами показала, что для сочетаний СВ « $K_U - u_{NMAX} - u_{ПР}$ » и « $u_{ПР} - \Delta t - du_{ВОССТ}/dt$ » при  $q = 0,05$  не отклоняется гипотеза о множественной корреляции, следовательно, каждый рассматриваемый параметр дугового замыкания стохастически жестко связан с парой других.

Анализ частных корреляций для выборок « $u_{ПР} - \Delta t - du_{ВОССТ}/dt$ » также выявил статистически незначимую зависимость « $du_{ВОССТ}/dt - \Delta t$ » при фиксированном  $u_{ПР}$ . Это означает, что скорость ПВН не связана с длительностью бестоковых пауз без учета связи с напряжением пробоя. При этом подтверждена значимость частной корреляции между « $u_{ПР} - \Delta t$ » при фиксированной скорости  $du_{ВОССТ}/dt$ , что свидетельствует о большем влиянии на напряжение повторных пробоев длительности бестоковых пауз, чем скорости ПВН.

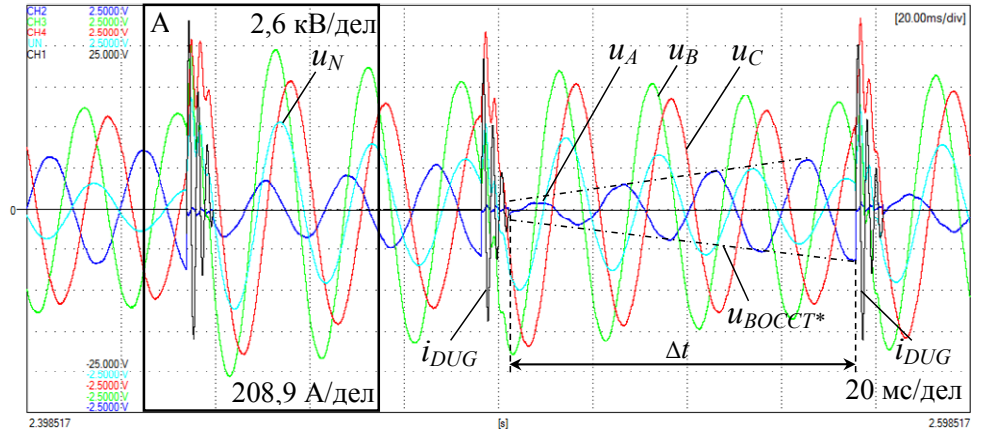


Рисунок 3 – Фрагмент натурной осциллограммы последовательных однофазных пробоев в БМПИ кабеля при эксперименте в сети 6 кВ

Выполненный на основе **результатов мониторинга перенапряжений** сравнительный анализ 239 осциллограмм переходных процессов при дуговых ОЗЗ в эксплуатируемой кабельной сети показал, что при наличии в нейтрали только ДГР примерно в 30% случаев имеют место многократные повторные пробой фазы на землю с частотой появления примерно в 5 – 10 раз выше, чем предполагается в теории при  $|v| \leq 0,05$ . Низкие скорости ПВН, расчетные значения которых составляют 5,0 – 35 В/мс при расстройках компенсации  $|v| \leq 0,05$ , не гарантируют снижения вероятности повторных пробоев, которые происходят в среднем на 20 – 30% чаще, чем в сети с КЗН.

Статистический анализ массива параметров электромагнитного процесса при ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ позволил определить параметры нормальных законов распределения для уровня  $K_U$ , электрического угла пробоя  $\psi$ , времени  $t_{DUG}$ . Была проведена оценка их статистических характеристик для сети с ДГР (индекс 1, 98 элементов в выборке) и КЗН (индекс 2, 141 элемент в выборке). Было показано, что минимальный относительный разброс наблюдается в выборках СВ  $K_{U(1,2)}$ : для них коэффициент вариации  $\sigma[X]/M[X] < 0,1$ , а максимальный – в выборках  $t_{DUG(1,2)}$  с коэффициентами вариации 0,375 и 0,518 соответственно. Это означает, что длительные режимы горения дуги не способствуют сколько-нибудь значимой эскалации перенапряжений:  $p(K_{U(1)} > M[K_{U(1)}] + 3\sigma[K_{U(1)}] = 2,55) \leq 0,05$ ;  $p(K_{U(2)} > M[K_{U(2)}] + 3\sigma[K_{U(2)}] = 2,53) \leq 0,05$ . По-

следнее заключение подтверждается высокими значениями разбросов времени горения дуги при пробоях при  $[K_{U(1,2)}] \ll 3,0$ .

На рисунке 4 представлены результаты сопоставления эмпирических и теоретических плотностей вероятностей времени горения дуги после первичного пробоя на землю, на рисунке 5 – электрических углов пробоя изоляции в кабельной сети 6 кВ, а также функции распределения этих СВ. Снижение длительности горения дуги – выраженный положительный эффект от внедрения КЗН (2) по сравнению с режимом компенсации (1):  $M[t_{DUG(1)}] = 2,81M[t_{DUG(2)}]$ .

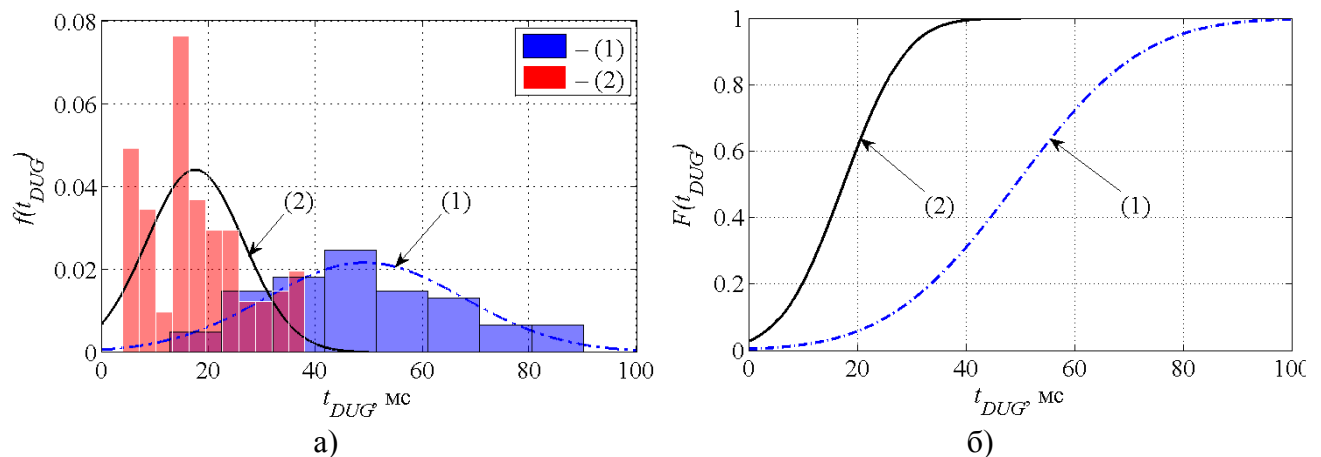


Рисунок 4 – Эмпирическая и теоретическая плотности (а) и интегральные функции (б) распределения длительности горения дуги  $t_{DUG}$  после первого пробоя

Показательно, что математическое ожидание  $M[t_{DUG(2)}] + 3\sigma[t_{DUG(2)}] = 44,72$  мс  $< M[t_{DUG(1)}] = 49,18$  мс, а вероятность  $p(M[t_{DUG(1)}] + 3\sigma[t_{DUG(1)}] = 104,5$  мс)  $< 0,05$ . Таким образом, верхние предельные по критерию Чебышева значения соотносятся как  $max[t_{DUG(2)}]/max[t_{DUG(1)}] = 0,428$ . Это означает, что чем меньше наблюдаемая длительность горения дуги в сети с ДГР, тем больше будет коэффициент снижения  $t_{DUG(1)}/t_{DUG(2)}$  за счет оснащения нейтрали этой же сети резисторами.

Выполнение соотношения  $t_{DUG(1)}/t_{DUG(2)} = 2,34 - 2,81$  представляется как ключевой положительный фактор минимизации вероятности повторных пробоев и развития аварийного события. Снижение времени горения дуги при наличии дополнительного активного тока в цепи замыкания закономерно, поскольку условия гашения заземляющей дуги при синфазных токе и напряжении лучше, чем при гашении остаточного реактивного тока, сдвинутого относительно напряжения дуги. Уместна аналогия с гашением дуги в камере высоковольтного выключателя: известно, что коммутировать индуктивный ток, опережающий напряжение на  $90^0$ , значительно сложнее.

Кривые плотностей вероятностей  $f(\psi_{(1)})$  и  $f(\psi_{(2)})$  (рисунок 5) смещены относительно угла  $\psi(u_{\Phi MAX}) = \pi/2$ , что характеризует некоторое отличие углов пробоя поврежденной фазы от теоретически наиболее вероятного. Поскольку математические ожидания углов пробоя фазы на землю относятся как  $M[\psi_{(1)}]/M[\psi_{(2)}] = 0,9$  и  $\sigma[\psi_{(2)}]/\sigma[\psi_{(1)}] = 0,8$ , влияние режима нейтрали на угол зажигания однофазной дуги нельзя признать существенным. Объединение выборок  $\psi_{(1)}$  и  $\psi_{(2)}$  при рассмотрении угла пробоя  $\psi \in [0; 2\pi]$  даст следующие интервалы  $M[\psi] \pm 3\sigma[\psi]$ : на полупериоде напряжения в положительной плоскости

$\psi_{(+)} = 1,714 \pm 0,372$  рад, в отрицательной плоскости  $\psi_{(-)} = 4,749 \pm 0,541$  рад. Это отвечает значениям  $M[u_{ПР}] = u_{\Phi MAX}$ ;  $\sigma[u_{ПР}] = (0,12 - 0,18)u_{\Phi MAX}$ .

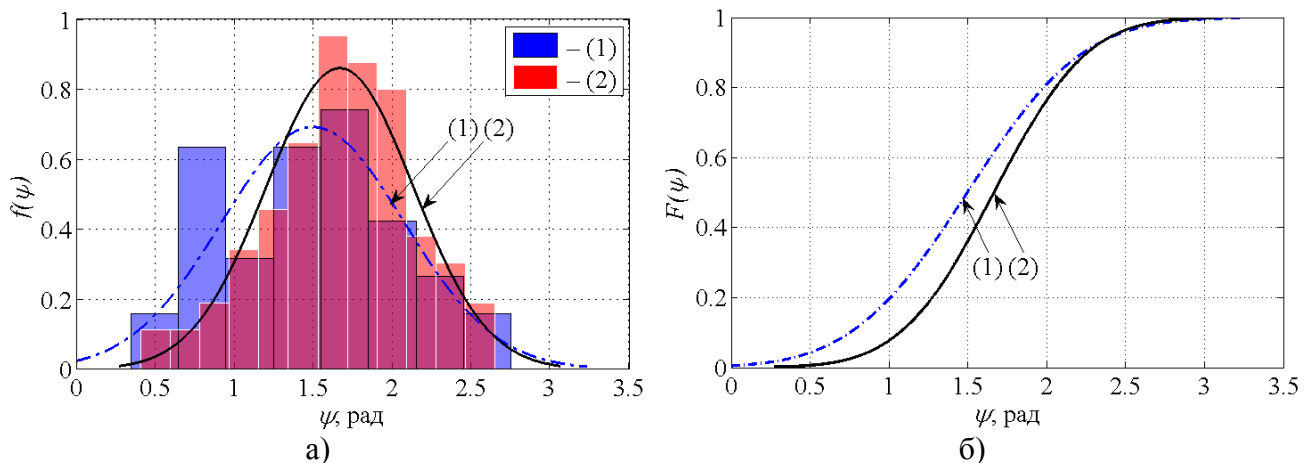


Рисунок 5 – Эмпирическая и теоретическая плотности (а) и интегральные функции (б) распределения угла электрического пробоя  $\psi$  фазы кабеля на землю

При переходе к режиму квазиустойчивого горения заземляющей дуги с непрерывными импульсными пробоями можно ожидать снижения и стабилизации напряжения пробоя на уровне  $M[u_{ПР}] - 3\sigma[u_{ПР}] = (0,46 - 0,64)u_{\Phi MAX}$ .

**В третьем разделе** представлены разработанные с учетом результатов натуральных экспериментов компьютерные модели электрической сети, с уточнением процесса развития дугового ОЗЗ в изоляции силовых КЛ с БМПИ на основе экспериментальных и аналитических исследований.

Закон распределения напряжения пробоя кабелей с БМПИ согласно выполненным статистическим исследованиям был принят нормальным с  $M[u_{ПР}] = (0,6 - 1,0)u_{\Phi MAX}$ : меньшие значения соответствуют режиму непрерывных импульсных пробоев с отклонением  $\sigma[u_{ПР}] = 0,1u_{\Phi MAX}$ , бóльшие – режиму однократных непериодических пробоев изоляции кабеля, когда  $M[u_{ПР}] \rightarrow u_{\Phi MAX}$ ;  $\sigma[u_{ПР}] = (0,12 - 0,18)u_{\Phi MAX}$ . Момент погасания дуги при пробое кабельной изоляции определяется в зависимости от двух факторов: а) соотношения скоростей ВЭП  $de_{ПР}/dt$  и ПВН  $du_{ВОССТ}/dt$  на поврежденной фазе; б) соотношения скорости  $di_{ДУГ}/dt$  подхода тока дуги к нулю и предельной скорости  $di_{ЛИМ}/dt$ , при которой происходит гарантированное погасание дуги. Оценка статистических характеристик скорости перехода тока через нуль перед гашением дуги позволила заключить, что математическое ожидание предельной скорости можно принять равным  $M[di_{ДУГ}/dt] = 450$  А/мс.

С учетом исследованного характера изменения ЭП в БМПИ для анализа переходных процессов при дуговых ОЗЗ в сети 10 кВ с КЛ большой протяженности была разработана и реализована математическая модель, отражающая влияние соотношения  $I_R/I_C$  на уровни перенапряжений  $K_U$ . В эквивалентной схеме КЛ моделировалась в виде П-схем (эквивалентирование участками по 500 м) с погонными параметрами  $R_0=0,258$  Ом/км;  $X_0=0,081$  Ом/км,  $C_0=0,215$  мкФ/км. Результаты расчета представлены на рисунке 6. Точки пересечения кривых  $K_U(I_R/I_C)$  при двух последовательных пробоях позволяют оценить сопротивление  $R_N$  для ограничения перенапряжений до уровня  $K_U \leq 2,4$  –

2,6. Достаточный номинал резистора в большинстве случаев соответствует соотношению  $I_R/I_C = 0,6 - 0,7$ , что обеспечивает меньший активный ток по сравнению с  $I_R/I_C \approx 1$  и несколько снижает тепловую нагрузку на изоляцию в режиме ОЗЗ.

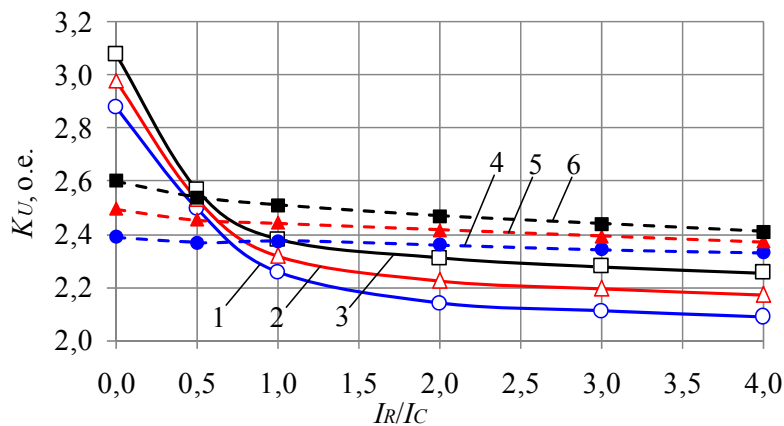


Рисунок 6 – Наибольшие расчетные перенапряжения при дуговом ОЗЗ по длине КЛ 10 кВ: 1, 2, 3 – в начале (0 км), середине (2,5 км) и конце (5,0 км) КЛ соответственно после второго пробоя; 4, 5, 6 – то же, после первого пробоя

распределенной емкости на землю. Удаление точки регистрации фазных напряжений от точки дугового ОЗЗ на 1 км приводит к росту  $K_U$  на 1 – 4% после первого пробоя и на 0,5 – 0,7% после второго. Следовательно, в разветвленных кабельных сетях с характерной длиной по фидеру до 15 – 16 км выбор резистора должен учитывать возможную зону обеспечиваемой им защиты, которую можно увеличить за счет повышения  $I_R/I_C$  до 1,2 – 1,5.

При учете соотношения скоростей ВЭП и ПВН и стабилизации напряжения пробоя в расчетных моделях дуговых замыканий в изоляции кабелей многочисленные повторные циклы зажигания и погасания дуги не приводят к заметной эскалации перенапряжений. Это хорошо соответствует реальной физической картине и подтверждается результатами осциллографирования переходных процессов при искусственных ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ распределительной ПС №104 «АСМ» г. Рубцовска. Регистрация фазных напряжений в двух точках – на секции шин подстанции, а также при удалении на 7,7 км по наиболее протяженному фидеру сети – показала, что уровни  $K_U$  могут увеличиваться по длине КЛ более чем на 20 – 25 %, а длительность фронта импульса перенапряжения повышается примерно на 0,1 – 0,5 мс.

С помощью расчетной модели подтверждено, что более высокие частоты переходного процесса и в токе дугового замыкания, и в напряжении неповрежденных фаз соответствуют более ранним переходам тока дуги через нуль с ее погасанием.

В ряде случаев при дуговых ОЗЗ на КЛ наблюдается рост  $K_U$  по длине линии (рисунок 7), что обусловлено влиянием

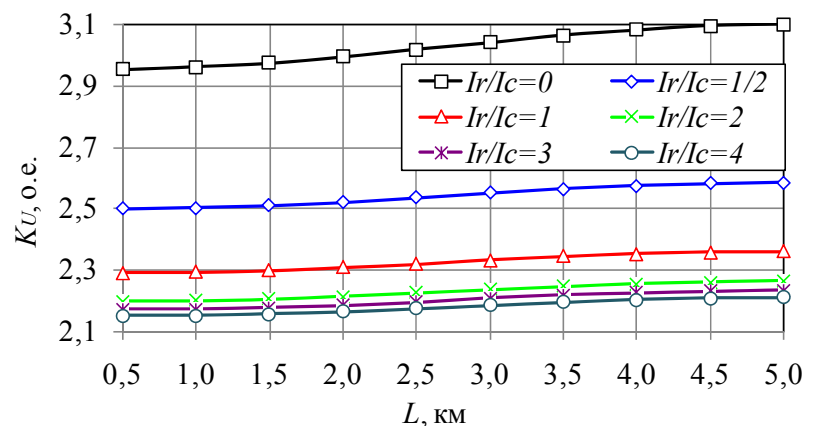


Рисунок 7 – Распределение перенапряжений по длине КЛ 10 кВ с БМПИ

Для оценки **сопротивления в месте пробоя на основе измеренных токов высших гармоник** в цепи замыкания были использованы результаты измерения параметров тока ОЗЗ в эксплуатируемой кабельной сети 6 кВ с остаточным током раскомпенсации частотой 50 Гц  $I_{OCT(1)} = 30,6$  А и током гармонического искажения  $I_{GARM} = 2,57I_{OCT(1)}$ . Мгновенные значения гармонических искажений напряжения на дуге, пропорциональные токам гармоник  $i_{(n)}$  амплитудой  $I_{(n)MAX}$ , круговой частотой  $\omega_{(n)}$  и начальной фазой  $\varphi_{(n)}$  рассчитывались как:

$$\Delta u_{(n)} = R_{DUG} \cdot i_{(n)} = R_{DUG} \cdot I_{(n)MAX} \cdot \sin(\omega_{(n)}t + \varphi_{(n)}). \quad (1)$$

При усредненном сопротивлении столба дуги  $R_{DUG} = 2,8 - 6,5$  Ом, принятого по результатам исследований В.Ф. Солдатова (журн. Электрические станции, 1996, № 8), наибольшие результирующие мгновенные  $i_{(n)}$  и  $\Delta u_{(n)}$  наблюдаются при условии  $t_{OЗЗ} \leq 20$  мс в момент времени  $t_{ПР} = 17,8$  мс:  $|\Sigma i_{(n)}| = 167,7$  А;  $|\Sigma \Delta u_{(n)}| = 470 - 1090$  В;  $|\Sigma \Delta u_{(n)}|/u_{\Phi MAX} = 0,10 - 0,22$ , а наименьшие – в момент времени  $t_{ПР} = 11$  мс:  $|\Sigma i_{(n)}| = 25,03$  А;  $|\Sigma \Delta u_{(n)}| = 70,1 - 162,7$  В;  $|\Sigma \Delta u_{(n)}|/u_{\Phi MAX} = 0,01 - 0,03$ . Следовательно, при учете наличия в токе ОЗЗ выраженных гармоник напряжение на поврежденной фазе при непрерывном горении дуги может оказаться больше. Тогда сопротивление в месте замыкания в режиме устойчивого горения дуги с учетом известного тока гармонического искажения, для тяжелого расчетного случая при  $|\Sigma \Delta u_{(n)}|_{MAX} = (0,10 - 0,22)u_{\Phi MAX}$  можно оценить как:

$$R_3 = \frac{|\Sigma i_{(n)}|}{I_{OCT}} \cdot R_{DUG} = \frac{|\Sigma \Delta u_{(n)}|}{\sqrt{I_{OCT(1)}^2 + I_{GARM}^2}}, \quad (2)$$

откуда  $R_3 = 8,6 - 19$  Ом. При неучете высших гармоник в токе замыкания для рассматриваемого случая  $R_3 = 3,9 - 9,0$  Ом. Таким образом, сопротивление в месте замыкания  $R_3$  при устойчивом горении дуги при учете тока гармонического искажения примерно в два раза выше, чем  $R_3$ , вычисленное только для частоты 50 Гц. Поскольку стабилизация напряжения пробоя в области значений  $u_{ПР} \leq (0,1 - 0,2)u_{\Phi MAX}$  характеризует переход в режим непрерывного горения дуги, время его достижения теоретически может снижаться при  $I_{(n)} \geq I_{(1)}$  за счет гармонического искажения тока дуги, которое вызывает не только увеличение действующего остаточного тока, но и сопротивления в месте повреждения.

**Четвертый раздел** содержит результаты исследования ЭП и разработки алгоритмов (механизмов) и гипотез развития замыканий на землю в БМПИ и СПЭ-изоляции силовых кабелей.

Однофазному пробое изоляции и зажиганию заземляющей дуги предшествует процесс снижения ЭП диэлектрика. Для адекватного описания предпробойных процессов проанализированы механизмы снижения длительной и импульсной ЭП изоляции кабелей. Исходные значения ЭП БМПИ и СПЭ-изоляции промышленных силовых кабелей при частоте приложенного напряжения 50 Гц сопоставимы. Время достижения значений остаточной ЭП 10 – 15 кВ/мм при максимально допустимой электрической и тепловой нагрузке на кабель у СПЭ-изоляции примерно в 2 раза выше, чем у БМПИ. Показано, что для

СПЭ-изоляции без повреждений наибольшая ЭП достигается на сверхнизкой частоте (СНЧ), превышая при этом расчетное значение 40 кВ/мм на 50 Гц в 1,84–2,15 раза (рисунок 8).

С ростом частоты напряжения от 50 Гц до 1 кГц ЭП для СПЭ-изоляции снижается в 1,7 раз, а до 10 кГц – в 3,5 раза. С этим связано негативное воздействие ВЧ перенапряжений на СПЭ-

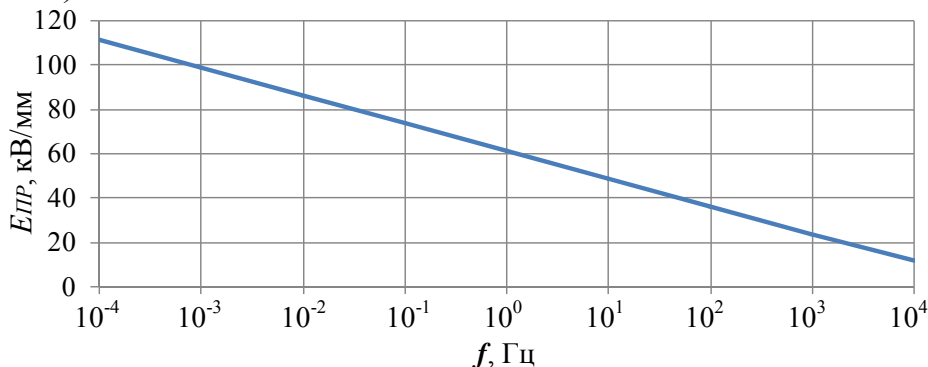


Рисунок 8 – Зависимость ЭП для СПЭ-изоляции (без дефектов) промышленного кабеля от частоты приложенного напряжения

изоляцию в режимах дуговых ОЗЗ и снижение времени до пробоя, что следует учитывать в расчете закладываемого запаса по толщине изоляции при конструировании кабелей.

Процесс пробоя и горения дуги адекватно описывается интегральной моделью на основе нелинейного сопротивления изоляции  $R_{IZ}$  и канала заземляющей дуги  $R_{DUG}$ . Графическая интерпретация модели представлена на рисунке 9, где приведен и характер изменения напряжения пробоя изоляции. На интервале  $(0 - t_1)$ , соответствующем возникновению единичных «клевок» на землю (*первый этап*), происходит экспоненциальное снижение сопротивления изоляции (строго говоря, это еще не сопротивление дуги) от  $R_1 = 100 - 200$  кОм до  $R_2 = 0,5 - 10$  Ом. При этом падает и напряжение пробоя от  $u_1 = nu_{\phi MAX}$  (где  $n \gg 1$ ) до  $u_2 = (0,1 - 0,9)u_{\phi MAX}$ .

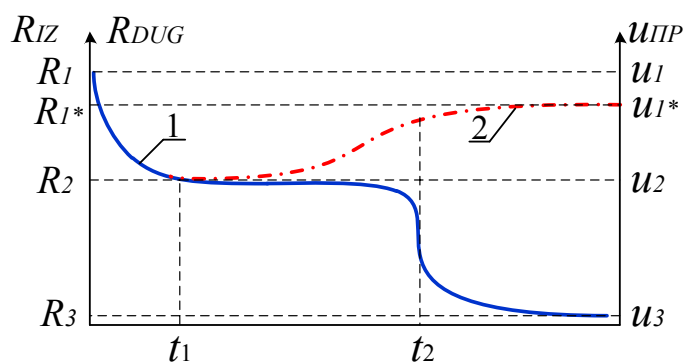


Рисунок 9 – Качественный характер изменения сопротивления канала горения дуги и напряжения пробоя для БМПИ силового кабеля в процессе развития дугового ОЗЗ: 1 – процесс развития неустранившегося дугового ОЗЗ, 2 – самовосстановление ЭП изоляции

Указанные значения подтверждены результатами анализа осциллограмм, полученных при регистрации переходных процессов в сетях 6 кВ с БМПИ-кабелями. На интервале  $(t_1 - t_2)$  (*второй этап*) определяется возможность дальнейшего развития процесса ОЗЗ. В зависимости от параметров сети и режима нейтрали с вероятностью  $p = 0,70 - 0,85$  происходит самопогасание дуги за счет двух одновременных процессов: «заплывание» канала пробоя подтекающим кабельным маслом

(единицы секунд) и возникновение ударных давлений в образовавшемся газом «пузыре» (единицы миллисекунд) и кривая 1 переходит в кривую 2, напряжение пробоя восстанавливается до значений  $U_{1*} = (2 - 4)U_{\phi}$ , а сопротивление  $R_{1*} = 10^4 - 10^5$  Ом. С вероятностью  $1 - p \approx 0,15 - 0,30$  имеет место развитие про-



цесса с изменением режима горения дуги. При этом начальный рост  $u_{ПР}$  связан с повышением газовой выделением в канале пробоя (переход к кривой 2), а стабилизация и спад – с расширением этого канала вследствие разрушения изоляции и его науглероживанием (кривая 1 при  $t > t_1$ ).

В момент времени  $t_2$  (начало третьего этапа) происходит мощный импульсный пробой с последующим снижением напряжения  $u_{ПР}$  до значений  $U_3 \leq 0,1U_{Ф}$ , которое тем быстрее, чем больше количество повторных пробоев. Далее в течение долей секунд происходит развитие (расширение) канала горения и переход последовательных импульсных пробоев в режим непрерывного горения дуги, сопротивление дуги при этом достигает минимальных значений  $R_3 = 10^{-1} - 10^{-5}$  Ом. Случайность моментов пробоя и различные сочетания параметров ОЗЗ могут приводить к исключению некоторых стадий развития ОЗЗ в кабельной изоляции.

Для кабельной СПЭ-изоляции пробой носит необратимый характер и восстановление ЭП до значений, обуславливающих длительное отсутствие повторных пробоев, теоретически невозможно. С учетом этого предложена гипотеза развития дугового ОЗЗ в СПЭ-изоляции, в которой выделены четыре этапа. *Первый этап* пробоя представляет собой комбинацию предпробойных состояний и характеризуется последовательным объединением внутренних дефектов (побочных каналов электрических триингов) с повышением интенсивности ЧР в них. *Второй этап* связан с быстрой ионизацией газовой смеси в формирующемся канале пробоя, возможен механизм ударной ионизации электронами в зонах пониженной плотности полимера. *На третьем этапе* происходит объединение близлежащих побочных ветвей в направлении пробоя и наблюдается начало перехода СПЭ в область высокоэластичных состояний, задействуется механизм электромеханического пробоя за счет сжатия силами электростатического поля. *Четвертый этап* пробоя является завершающим. Он сопровождается искровым разрядом и, при условии достаточной ионизации канала, происходит зажигание столба заземляющей дуги, представляющей собой низкотемпературную плазму.

Характерные кривые изменения во времени ЭП СПЭ-изоляции  $e_{ПР}$  и сопротивления изоляции  $R_{IZ}$  (сплошные линии, ось ординат слева) представляют собой показательные функции, асимптотически приближающиеся к осям абсцисс и ординат (рисунок 10). Кривые изменения температуры (штрих-пунктирные линии, ось ординат справа) отражают близкую к экспоненциальной зависимость

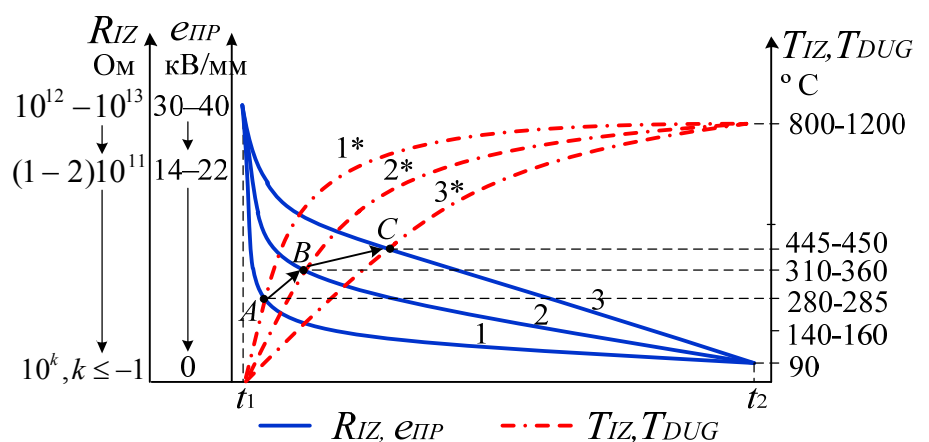


Рисунок 10 – Качественный характер развития процессов пробоя кабельной СПЭ-изоляции во времени

нагрева изоляции в процессе развития пробоя. На осях ординат приведены численные значения, соответствующие основным состояниям СПЭ-изоляции: новая неповрежденная изоляция кабеля:  $R_{IZ} = 10^{12} - 10^{13}$  Ом,  $E_{\text{ПР}50 \text{ Гц}} = 30 - 40$  кВ/мм; ослабленная изоляция кабеля, в которой идет интенсивное развитие предпробойных процессов:  $R_{IZ} = 10^8 - 10^9$  Ом,  $E_{\text{ПР}50 \text{ Гц}} = 14 - 22$  кВ/мм; пробитая изоляция кабеля, не способная к самовосстановлению ЭП:  $R_{IZ} \equiv R_{DUG} = 10^k$  Ом ( $k \leq -1$ ),  $E_{\text{ПР}50 \text{ Гц}} = 0$ . В той же временной области приведены графики роста температуры изоляции  $T_{IZ}$  до пробоя примерно при  $340 - 480$  °С с переходом к температуре дугового столба до  $T_{DUG} \cong 5000$  К по его оси.

На основе экспериментальных исследований, результаты которых изложены в стандарте IEEE 400-2001, можно сопоставить приведенные кривые изменения  $R_{IZ}$ ,  $e_{\text{ПР}}$  и  $T_{IZ}$  ( $T_{DUG}$ ) со скоростью  $V_{\text{ПР}}$  развития каналов пробоя СПЭ-изоляции. На рисунке 10 графики 1 и 1\* качественно соответствуют  $V_{\text{ПР}} = 175 - 611$  мм/ч при  $K_U = 4U_{\Phi}$ ; 2 и 2\* –  $V_{\text{ПР}} = 2,2 - 5,9$  мм/ч при  $K_U = 3U_{\Phi}$ ; 3 и 3\* –  $V_{\text{ПР}} = 1,7 - 2,4$  мм/ч при  $K_U = 2U_{\Phi}$ . При воздействии ВЧ перенапряжений уровнем  $(2 - 4)U_{\Phi}$  скорость развития канала пробоя будет увеличиваться, поэтому возможен переход «рабочей точки» по траектории  $A \rightarrow B \rightarrow C$ .

Характерные кривые характеристик однофазной дуги, в том числе ее динамического сопротивления  $R_{DUG}(t)$  в режиме перемежающегося замыкания на землю в БМПИ кабеля (рисунки 2 – 3) приведены на рисунке 11.

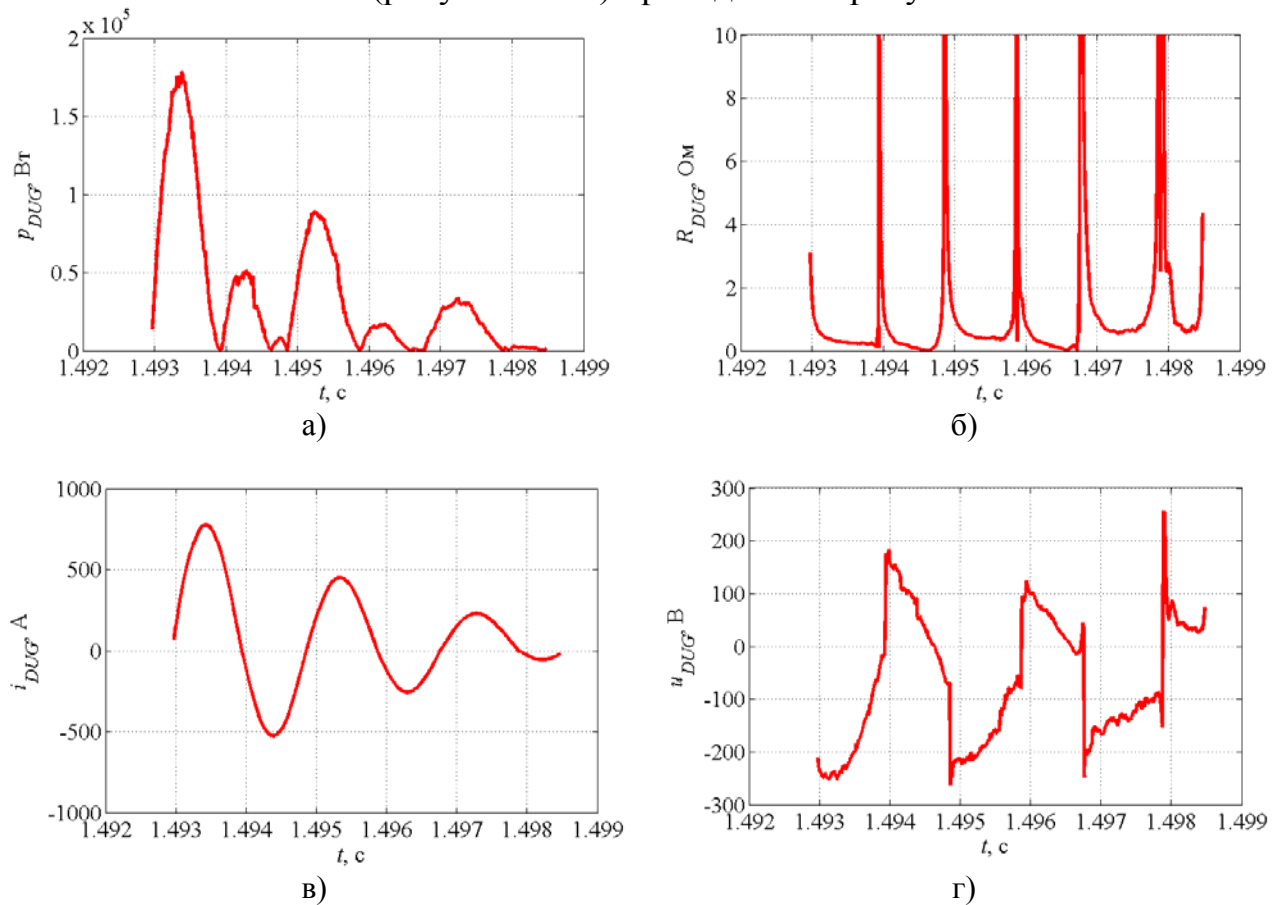


Рисунок 11 – Характерные кривые изменения мгновенной мощности (а), сопротивления (б), тока дуги (в) и напряжения на однофазной дуге (г) в процессе ее перемежающегося горения в БМПИ кабеля

Наибольшие мгновенные значения  $R_{DUG(MAX)} = 1,3 \cdot 10^2 - 9,5 \cdot 10^4$  Ом динамического сопротивления дугового канала соответствуют моментам перехода через ноль ВЧ тока дуги, что подтверждает возможность ее гашения именно в эти моменты. Достигаемое к концу каждого полупериода ВЧ тока дуги значение  $R_{DUG} \rightarrow 10^2 - 10^5$  Ом может служить пограничным значением, характеризующим успешное/неуспешное погасание дуги при однофазном повреждении изоляции кабеля. В то же время моменты перехода через нуль напряжения соответствуют минимальным значениям  $R_{DUG(MIN)} = 8 \cdot 10^{-6} - 1,0 \cdot 10^{-1}$  Ом динамического сопротивления дуги.

Параметры дуги можно оценить интегральными значениями, вводя понятия тепловых эквивалентов: пусть  $I_{DUG}$  – значение тока дуги, непрерывное протекание которого по фиксированному сопротивлению дуги  $R_{DUG}$  в течение времени  $t_{DUG}$  вызовет выделение на ней энергии  $W_{DUG}$ . Статистическая обработка позволила определить их характеристики для режима импульсных однофазных пробоев (рисунок 2). Проверка гипотез о виде законов распределения показала, что  $W_{DUG}$  и  $I_{ЭКВ}$  распределены по нормальному (проверка по критерию Д’Агостино), а  $R_{DUG}$  – по экспоненциальному (проверка по критерию Колмогорова – Смирнова) законам.

Наибольшей плотности распределения соответствуют средние значения  $R_{DUG} = 0,3 - 4,5$  Ом для дуги в БМПИ кабеля. Для рассматриваемого режима импульсных пробоев БМПИ кабеля констатируется, что с доверительной вероятностью 0,95 выделяемая энергия в пробое не превышает 325 Дж, тепловой эквивалент тока дуги – 184,1 А, сопротивление дуги – 9,7 Ом.

Оценка средней мощности дуги при рассматриваемом режиме импульсных пробоев показала, что  $30 \text{ Дж/мс} \leq P_{DUG} \leq 70 \text{ Дж/мс}$ ,  $M[P_{DUG}] = M[W_{DUG}] / M[t_{DUG}] = 36,6 \text{ Дж/мс}$ . Для сравнения были получены параметры пробоя с длительным ( $t_{DUG} = 54,2 \text{ мс}$ ) и по истечении  $\approx 10 \text{ мс}$  устойчивым горением заземляющей дуги в кабеле, наибольшие и наименьшие мгновенные значения динамического сопротивления дугового канала составили  $R_{DUG(MAX)} = 2,8 \cdot 10^5$  Ом и  $R_{DUG(MIN)} = 0,88$  Ом соответственно. Тепловые эквиваленты сопротивления и тока дуги при заданных условиях оказались равны 60,9 Ом и 22,7 А соответственно, а средняя мощность  $P_{DUG} = 31,4 \in [30; 70] \text{ Дж/мс}$ . Это свидетельствует о возможности распространения полученных для режима импульсных пробоев значений энергии дуги на режим ее квазистойчивого горения.

Значения  $W_{DUG}$ ,  $I_{DUG}$  и  $R_{DUG}$  для режима импульсных однофазных пробоев СПЭ-изоляции кабеля при  $t_{DUG} \leq 5 \text{ мс}$  были рассчитаны по результатам трех последовательных опытов с несколькими повторными пробоями в каждом. Статистические характеристики получить не удалось вследствие малого объема выборок. Наибольшие и наименьшие мгновенные значения динамического сопротивления дугового канала в СПЭ-изоляции в моменты перехода через нуль ВЧ тока дуги ( $R_{DUG(MAX)} = 1,3 \cdot 10^2 - 3,6 \cdot 10^4$  Ом) и напряжения на дуге ( $R_{DUG(MIN)} = 5,3 \cdot 10^{-4} - 3,0 \cdot 10^{-1}$  Ом) соответственно укладываются в более широкие диапазоны мгновенных значений сопротивления для режима импульсных пробоев БМПИ кабеля.

Энерговыведение в канале горения дуги в СПЭ оценено как  $100 \text{ Дж/мс} \leq P_{DUG} \leq 260 \text{ Дж/мс}$ , что в 3,3 – 3,7 раз выше, чем в БМПИ силового кабеля в режиме импульсных пробоев. Следовательно, скорость разрушения СПЭ-изоляции при дуговом ОЗЗ в кабеле выше, чем в БМПИ при прочих равных условиях. Это можно пояснить следующим образом. Кабели с изоляцией СПЭ с индексами нг, нг-LS (оболочка кабеля содержит антипирены) не поддерживают горение только в случае отсутствия тока подпитки дуги, в том числе тока ОЗЗ. В силу своей химической природы СПЭ является легкогорючим материалом с относительно высокими значениями теплоты сгорания (48 МДж/кг, что примерно в 3 раза выше, чем у целлюлозы и до 20% выше, чем у кабельного масла), самовоспламенение которого происходит при воздействии температур более  $340^\circ\text{C}$ . При этом время горения, соответствующее времени существования ОЗЗ, достигает единиц секунд и минут, вызывая расширение зоны повреждения КЛ. Поэтому ОЗЗ должно быть отключено с минимальной выдержкой времени.

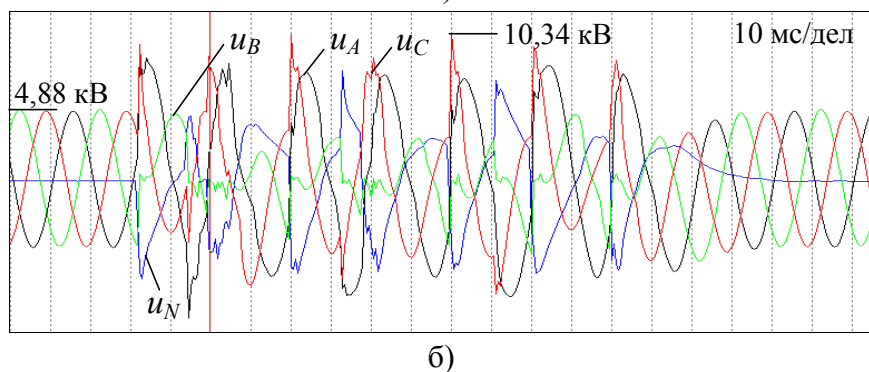
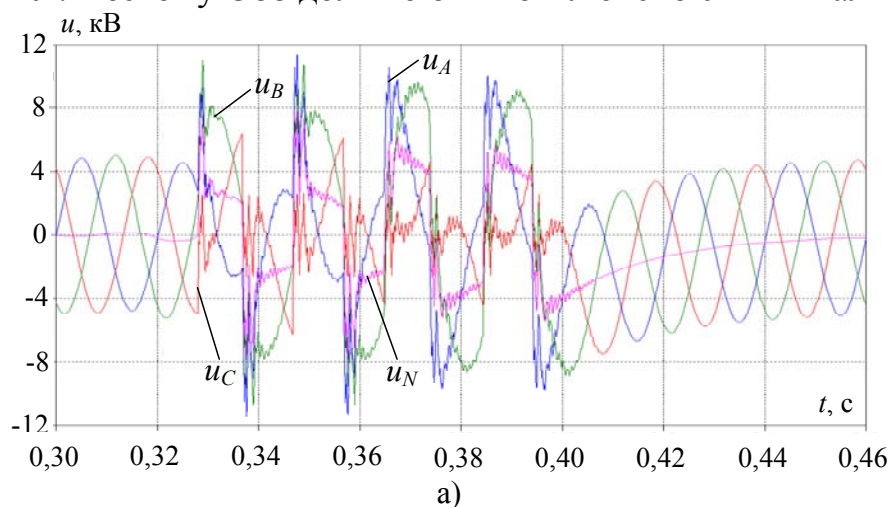


Рисунок 12 – Компьютерная (а) и натурная (б) осциллограммы перебегающего дугового замыкания в БМПИ с самоустранением ОЗЗ

С использованием предложенных алгоритмов развития дугового замыкания в программе ЕМТР-АТР были выполнены проверочные расчеты на модели кабельной сети 6 кВ, отражающие переходные процессы при многократных повторных пробоях в силовом кабеле с БМПИ и сопоставленные с результатами цифровой регистрации перенапряжений в эксплуатируемой кабельной сети при  $I_R/I_C < 1$  (рисунок 12). Повторные пробои следуют с  $\Delta t = 10 - 20 \text{ мс}$ , что соответствует условиям горения перебегающей дуги. Сравнение демонстрирует хорошую сходимость результатов расчета и регистрации в амплитудной и частотной областях с погрешностью по заданному алгоритму не более 10%.

Рекомендуемые по результатам работы мероприятия по повышению надежности эксплуатации КЛ на основе кабелей с СПЭ-изоляцией включают: внедрение норм и методов входного контроля кабелей, арматуры и материалов на эксплуатирующем предприятии; контроль качества монтажа и прокладки КЛ; применение щадящих методов испытаний повышенным напряжением СНЧ

(приведены конкретные нормы для напряжения синусоидальной и косинусно-прямоугольной формы) и диагностирования. Предложенные критерии выявления предаварийного состояния СПЭ-изоляции кабелей основаны на анализе измеренных значений сопротивления изоляции и коэффициентов абсорбции,  $tg\delta$ , кажущегося заряда и напряжения возникновения ЧР и ряда других диагностических параметров и отражены в разработанной нормативно-технической документации.

В качестве инструмента контроля параметров кабельной сети разработана и введена в эксплуатацию высокочастотная система сбора данных – регистратор СПЕКТР 1.01. Он позволяет осуществлять непрерывный контроль и регистрацию напряжений в переходных и аварийных режимах в частотном диапазоне от 25 Гц до 42,5 кГц по каждому каналу. Передача результатов измерений на удаленный ПК оператора происходит в режиме реального времени, что является серьезным преимуществом: просмотр и анализ осциллограмм событий возможен сразу после их завершения.

С момента включения систем СПЕКТР на двух распределительных городских ПС 110/10 кВ за год работы регистраторов в кабельной сети 10 кВ было зарегистрировано 140 событий (100%), в том числе:

- 102 случая дуговых ОЗЗ (72,9%), самоустранившихся либо выявленных и принудительно отключенных с предварительным переводом на резерв;
- 25 случаев перехода дуговых ОЗЗ в междуфазные КЗ (17,8%) с аварийным отключением присоединений;
- 13 случаев возникновения междуфазных КЗ без «земли» (9,3%).

Опыт эксплуатации показал, что применение таких ВЧ систем регистрации позволяет оперативно выявлять единичные пробои изоляции и предупреждать в среднем до 30% аварийных отключений КЛ.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основании комплекса аналитических и экспериментальных исследований в диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача разработки алгоритмов (механизмов) развития замыканий на землю в кабельных сетях с неэффективно заземленной нейтралью и мер повышения эксплуатационной надежности силовых КЛ с разными типами изоляции.

По работе сформулированы следующие основные выводы:

1. Выполнено аналитическое исследование частотных, амплитудных и временных параметров электромагнитных процессов при ОЗЗ в кабельной изоляции. Показано, что, в отличие от классических представлений, заземляющая дуга в изоляции силового кабеля с БМПИ может существовать более 10 мин, характерными являются времена до 1 – 2 с. В кабелях с СПЭ-изоляцией длительность дугового ОЗЗ, как правило, не превышает 1 – 2 мин до аварийного отключения.

2. Впервые для режима перемежающегося дугового ОЗЗ в пропитанной изоляции кабеля получены статистические оценки продолжительности бестоковых пауз, скорости изменения ВЧ тока дуги перед ее гашением, скорости ПВН на поврежденной фазе и ряда других параметров. Подтверждена множе-

ственная и частная корреляция в сочетаниях «уровень перенапряжений – амплитуда напряжения на нейтрали – напряжение пробоя» и «напряжение пробоя – длительность бестоковых пауз – скорость ПВН».

3. Показано, что низкие скорости ПВН даже при расстройках компенсации ДГР в пределах 5% не обеспечивают ожидаемого снижения вероятности повторных пробоев при эксплуатации изношенной изоляции кабеля. Выявлено и теоретически обосновано снижение длительности горения дуги после первичного пробоя на землю в среднем в 2,6 раза в сети с КЗН относительно сети с ДГР. Этот эффект связан с облегчением условий гашения дуги в БМПИ за счет дополнительной активной составляющей тока ОЗЗ.

4. Подтверждено, что погасание заземляющей дуги в БМПИ кабеля происходит при первом или последующем переходах свободной составляющей тока заземляющей дуги частотой до 4 – 6 кГц через нулевое значение, а стабилизация напряжения повторных пробоев на уровне математического ожидания  $0,6u_{\phi MAX}$  и ниже ограничивает эскалацию перенапряжений при дуговых ОЗЗ.

5. Разработана математическая модель электрической сети с КЛ большой протяженности, позволяющая оценить распределение перенапряжений при дуговых ОЗЗ по длине линии. Показана необходимость учета зоны защитного действия резистора и возможности ее расширения за счет увеличения  $I_R/I_C$  до 1,2 – 1,5 в разветвленных сетях. Предложена методика и выполнен уточненный расчет сопротивления в месте однофазного повреждения кабеля с учетом гармоник в цепи ОЗЗ, дающий корректировку в сторону увеличения сопротивления примерно в два раза.

6. Впервые разработаны и экспериментально проверены алгоритмы (механизмы) развития многостадийного процесса пробоя и зажигания однофазной заземляющей дуги в БМПИ и СПЭ-изоляции силовых кабелей. Полному пробоя диэлектрика предшествует длительный процесс снижения ЭП изоляционного промежутка, сопровождающийся экспоненциальным уменьшением сопротивления изоляции на 2 – 4 порядка.

7. По результатам эксперимента статистически оценены тепловые эквиваленты тока, сопротивления и энергии заземляющей дуги. Показано, что значения динамического сопротивления дуги  $10^2 – 10^5$  Ом являются пограничными и характеризуют успешное/неуспешное погасание заземляющей дуги.

8. Установлено, что энерговыделение в канале горения дуги в режиме импульсных однофазных пробоев в СПЭ в среднем в 3,5 раза выше, чем в БМПИ, при одних и тех же параметрах сети. Это связано с теплофизическими характеристиками СПЭ-изоляции. Для минимизации области повреждения в СПЭ-кабелях следует реализовать заземление нейтрали сети через резистор сопротивлением в диапазоне 10 – 200 Ом и током до 400 – 600 А.

9. Предложены методические и практические мероприятия, направленные на повышение надежности эксплуатации силовых КЛ с СПЭ-изоляцией. Разработаны и введены в эксплуатацию в кабельной сет 10 кВ распределенные ВЧ системы сбора данных, предназначенные для контроля параметров сети с целью предупреждения аварийных отключений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ:

*Из перечня рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:*

1. Иванов, А. В. Исследования параметров тока однофазного замыкания на землю в сети 6 кВ Оренбургского ГПЗ / А. В. Иванов, Л. И. Сарин, А. И. Ширковец // Газовая промышленность. – 2008. – № 12 (625). – С. 79–81.
2. Сарин, Л. И. Опыт применения резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ / Л. И. Сарин, А. И. Ширковец, М. В. Ильиных // Энергетик. – 2009. – №4. – С. 13–14.
3. Ильиных, М. В. Исследование процессов при металлических и дуговых ОЗЗ в условиях резистивно-заземленной и изолированной нейтрали в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез Тугнуйский» / М. В. Ильиных, А. И. Ширковец, А. А. Кузьмин, И. Е. Волокитин // В сб. «Электрификация и энергоэффективность». Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – М. : Горная книга, 2011. – № ОВ4. – С. 344–361.
4. Ширковец, А. И. Технология эксплуатации и критерии отбраковки кабелей среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена / А. И. Ширковец // Энергетик. – 2011. – № 10. – С. 32–36.
5. Ширковец, А. И. Математическая модель горения однофазной дуги в изоляции силовых кабелей с графической интерпретацией развития пробоя на основе нелинейного сопротивления дугового канала / А. И. Ширковец, Д. Ф. Губаев // Известия вузов: Проблемы энергетики. – 2012. – № 9-10. – С.121–134.

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

6. Ширковец, А. И. Методические подходы к осциллографированию процессов при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-35 кВ / А. И. Ширковец, М. В. Ильиных // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – спец. вып. № 1. – С. 44–51.
7. Сарин, Л. И. Анализ результатов мониторинга процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ с дугогасящими реакторами и резисторами в нейтрали / Л. И. Сарин, М. В. Ильиных, А. И. Ширковец, Э. В. Буянов, В. Н. Шамко // Энергоэксперт. – 2008. – № 1. – С.56–64.
8. Ширковец, А. И. Резистивное заземление нейтрали в сетях 6-35 кВ с СПЭ-кабелями. Подходы к выбору резисторов и принципам построения защиты от ОЗЗ / А. И. Ширковец, Л. И. Сарин, М. В. Ильиных, В. Н. Подьячев, А. И. Шалин // Новости Электротехники. – 2008. – № 2 (50). – С. 3–6.

9. *Shirkovets, A.* Experimental Investigations and Calculations in 6-35 kV Networks with Various Neutral Conditions = Экспериментальные и расчетные исследования в сетях 6-35 кВ с различными режимами заземления нейтрали / *A. Shirkovets, A. Vasilyeva, A. Telegin* // Electric Power Quality and Supply Reliability : Proceedings of PQ2010 7th International Conference, Kuressaare, Estonia, June 16-18, 2010. – Tallinn : Tallinn University of Technology, 2010. – P. 191–195.
10. *Ширковец, А. И.* Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги / *А. И. Ширковец* // Релейная защита и автоматизация. – 2011. – № 4. – С. 54–59.
11. *Shirkovets, A.* Transient Processes at Single Phase-to-Ground Faults in Combined Grounded Networks = Переходные процессы при однофазных замыканиях на землю в сетях с комбинированным заземлением нейтрали / *A. Shirkovets, A. Vasilyeva, A. Telegin, L. Sarin* // Electric Power Quality and Supply Reliability : Proceedings of PQ2012 8th International Conference, Tartu, Estonia, June 11-13, 2012. – Tallinn : Tallinn University of Technology, 2012. – P. 215–221.
12. *Shirkovets, A.* Integral Arc Models at Single Phase-to-Ground Faults and Special Characteristics of Arcing in Power Cable Insulation = Интегральные модели дуги однофазного замыкания на землю и характерные особенности процесса ее горения в изоляции силовых кабелей / *A. Shirkovets* // Electric Power Quality and Supply Reliability : Proceedings of PQ2012 8th International Conference, Tartu, Estonia, June 11-13, 2012. – Tallinn : Tallinn University of Technology, 2012. – P. 241–247.
13. *Телегин, А. В.* Проблематика замыканий на землю и режим заземления нейтрали в сетях среднего напряжения стран Европы и Америки / *А. В. Телегин, А. И. Ширковец* // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 3. – С. 30–39.
14. *Ширковец, А. И.* Характеристики перенапряжений и особенности горения дуги при замыканиях на землю в кабельных сетях с линиями большой протяженности / *А. И. Ширковец* // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 3. – С. 40–48.
15. *Ширковец, А. И.* Классификация замыканий на землю и оценка устойчивости сети к феррорезонансу на основе результатов регистрации аварийных событий / *А. И. Ширковец* // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – № 3. – С. 26–30.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

тел./факс. (383) 346-08-57

формат 60 X 84/16, объём 1,5 п.л., тираж 100 экз.

заказ № 1475 подписано в печать 14.11.2013 г.