

На правах рукописи

ДОРОНИН АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ
В ОБМОТКЕ СТАТОРА ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО В БЛОКЕ С
РЕАКТИРОВАННОЙ ОТПАЙКОЙ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетические системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и в ООО Научно-производственное предприятие «ЭКРА», г. Чебоксары

Научный руководитель:

Вайнштейн Роберт Александрович, доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Шуин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», профессор кафедры «Автоматического управления электроэнергетическими системами»

Глазырин Владимир Евлампиевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», доцент кафедры «Электрических станций»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ), г. Красноярск

Защита состоится «27» ноября 2013 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «___» октября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.269.10, д.т.н., с.н.с.

Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Устройства релейной защиты элементов электроэнергетических систем в настоящее время постоянно совершенствуются. Побудительными мотивами к проведению исследований в этой области являются такие факторы как, например, новые возможности современных технических средств, в частности микропроцессорной техники, появление у специалистов некоторых принципиально новых идей, а также появление в энергосистемах объектов, для которых выполнение защиты, удовлетворяющей современным требованиям, на основе известных методов и устройств невозможно.

Постановка и выполнение данной работы обусловлено последним из перечисленных факторов и, в частности, она посвящена исследованиям и разработке защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, работающих в блоке с трансформатором и питающих потребителей собственных нужд блока или некоторую местную сеть через реактированную отпайку. Энергетические блоки с такой электрической схемой часто применяются при расширении существующих ТЭЦ. В последнее время в энергосистемах Российской Федерации вводится по 2-3 таких блока в год.

Особенность задачи выполнения защиты от замыканий на землю в блоках с отпайкой состоит в том, что кроме требований отсутствия зоны нечувствительности при замыкании вблизи нейтрали обмотки статора генератора и обеспечения функционирования как при устойчивых, так и при дуговых перемежающихся замыканиях, требуется обеспечить избирательное действие защиты по отношению к повреждённому генератору.

Известные устройства защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов отечественной и зарубежной разработки, ориентированы на схему блоков без гальванической связи с внешней сетью. Поэтому функция избирательности в них отсутствует по принципу действия.

В одной из ранее выполненных работ предложено решение, основанное на наложении на первичные цепи генератора тока с частотой, отличающейся от промышленной, через разомкнутый треугольник трансформатора напряжения. Однако, в этой работе не исследована и не решена важная для защиты от замыканий на землю задача обеспечения функционирования при дуговых перемежающихся замыканиях. Также требуется усовершенствование технического исполнения основных элементов защиты, особенно с точки зрения совместимости с микропроцессорной элементной базой.

При выполнении работы автор использовал результаты исследований в области защиты от замыканий на землю, выполненных И.М. Сиротой, В.М. Кискачи, А.И. Левиушем, В.Г. Алексеевым, В.А. Шуиным, А.И. Шалиным, Ю.В. Целебровским, А.М. Наумовым, Р.А. Вайнштейном, а также зарубежных фирм «ABB», «Siemens».

Цель работы и задачи исследования

Целью работы является совершенствование защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов в блоках с реактированной отпайкой на основе исследования процессов при дуговых перемежающихся замыканиях и разработка основных технических элементов защиты.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи.

1. Обзор существующих методов и средств выполнения защиты в обмотке статора генераторов и выявление тех частных решений в составе известных устройств, которые могут быть использованы в данном случае.

2. Разработка источника для наложения на первичные цепи генератора тока с частотой, отличающейся от промышленной (контрольного тока), через типовые трансформаторы напряжения функционально совместимого с технологией цифровой обработки сигналов, в частности, с возможностью программного управления источником.

3. Исследование электрических процессов при дуговых перемежающихся замыканиях при наличии источника контрольного тока в цепи разомкнутого треугольника трансформаторов напряжения и выявление при таком виде повреждения закономерностей формирования составляющих с частотой контрольного тока в токе замыкания.

4. Определение состава релейных измерительных органов защиты и логической связи их дискретных выходов.

5. Разработка и обоснование методики выбора параметров настройки измерительных органов защиты.

6. Исследование электрических процессов и функционирования защиты на компьютерной и физической моделях.

7. Разработка технического исполнения элементов защиты в составе комплексной цифровой защиты генераторов.

Идея работы

Основная идея работы заключается в решении задачи обеспечения правильного функционирования защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях на землю на основе использования комплекса методов исследования: аналитических методов, методов компьютерного моделирования и физического моделирования.

Методы исследования

При проведении исследований использовались методы расчёта электрических цепей, методы спектрального анализа, математическое моделирование с реализацией в компьютерных программах, физическое моделирование, анализ данных, полученных на объектах внедрения защиты.

Достоверность результатов диссертационной работы, подтверждается удовлетворительным совпадением результатов исследований и расчётов, выполненных аналитическими методами, методами компьютерного и физического моделирования, а также анализом некоторых данных, полученных на объектах, где применена защита с наложением контрольного тока низкой частоты.

Научная новизна работы

1. Вскрыт механизм формирования составляющей с частотой контрольного тока в токе нулевой последовательности при перемежающихся замыканиях в случае включения источника контрольного тока через трансформатор напряжения. Этот механизм обусловлен тем, что ёмкость фаз сети в цикле зажигания и погасания дуги является средством накопления и передачи энергии от источника контрольного тока в цепь замыкания.

2. Установлено, что основными факторами, влияющими на значение составляющей контрольного тока в токе нулевой последовательности при перемежающихся замыканиях являются значение суммарной ёмкости фаз сети, связанной с цепями статора генератора, и число пробоев изоляции за полупериод напряжения источника контрольного тока.

3. Показано, что при используемой схеме включения источника контрольного тока форма напряжения генератора этого тока может быть принята в виде разнополярных прямоугольных импульсов, изменение длительности которых с целью автоматического изменения контрольного тока практически не приводит к изменению условий работы измерительных органов защиты как при устойчивых, так и при перемежающихся дуговых замыканиях.

Практическое значение и реализация результатов работы.

Результаты исследований, выполненных в работе, использованы для реализации функций защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора в блоке с реактированной отпайкой в комплексной цифровой защите ШЭ111Х, а также при разработке шкафа источника контрольного тока ШНЭ1150. В настоящее время защита применена на Ново-Рязанской, Ново-Иркутской ТЭЦ, Новокуйбышевской ТЭЦ-1 и др.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. При включении источника контрольного тока через разомкнутый треугольник трансформатора напряжения работоспособность защиты сохраняется при дуговых перемежающихся замыканиях, так как в токе замыкания формируется достаточно большая составляющая с частотой контрольного тока благодаря тому, что ёмкость фаз сети в цикле зажигания и погасания дуги является средством накопления и передачи энергии от источника контрольного тока в цепь замыкания.

2. Результаты исследования зависимости составляющей с частотой контрольного тока при дуговых перемежающихся замыканиях, которые позволили установить, что эта составляющая тем больше, чем больше суммарная ёмкость фаз сети, связанной с генератором, и чем больше число пробоев за полупериод напряжения источника контрольного тока. Число пробоев в свою очередь увеличивается при снижении пробивного напряжения, то есть при приближении характера замыкания к устойчивому.

3. Возможность выполнения источника контрольного тока с формой напряжения в виде разнополярных прямоугольных импульсов с регулируемой длительностью, поскольку при этом сохраняется полноценное функционирование защиты как при устойчивых, так и при дуговых перемежающихся замыканиях.

4. Состав, логические связи и методика выбора параметров срабатывания релейных измерительных органов защиты.

Личный вклад. Вскрыт механизм формирования составляющей с частотой 25Гц в токе замыкания при перемежающихся замыканиях. Разработаны математические модели и выполнены исследования электрических процессов при устойчивых и перемежающихся замыканиях. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования электронного генератора контрольного тока. Разработан состав релейных измерительных органов защиты и их логическое взаимодействие. Выполнены исследования функционирования защиты на полной математической модели блока, совмещённой с моделью защиты.

Апробация результатов исследований. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 18 – 20 Всероссийских научно-технических конференциях «Релейная защита и автоматика энергосистем (Москва, ВВЦ, 2008-2010 г.), на 7 Всероссийской научно-технической конференции ДНДС в ЧГУ (Чебоксары, 2007 г.), на научно-практической конференции РНК СИГРЭ (Чебоксары, 2007 г.), на Международной научно-практической конференции

«РЕЛАВЭКСПО-2012» (Чебоксары, 2012 г.), на 8 Всероссийской научно-технической конференции «ИТЭЭ-2012» в ЧГУ (Чебоксары, 2012).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 18 работ, в том числе: 8 статей в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК РФ; 6 статей - материалы докладов конференций.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 61 наименования, 4 приложений и содержит 125 рисунков. Общий объём диссертации 217 стр.: текст диссертации 197 стр., список литературы 7 стр., приложения 16 стр.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическое значение полученных результатов, очерчен круг задач решаемых в диссертации.

В первой главе приводится ряд примеров главных схем блоков генератор-трансформатор с реактированной отпайкой. Основными особенностями таких блоков, существенными для выполнения защиты, являются сравнительно малые ёмкостные токи замыкания на землю и работа сети, как правило, с изолированной нейтралью. При таких условиях и требовании избирательности защиты известные устройства не применимы. Возможным и в определённой

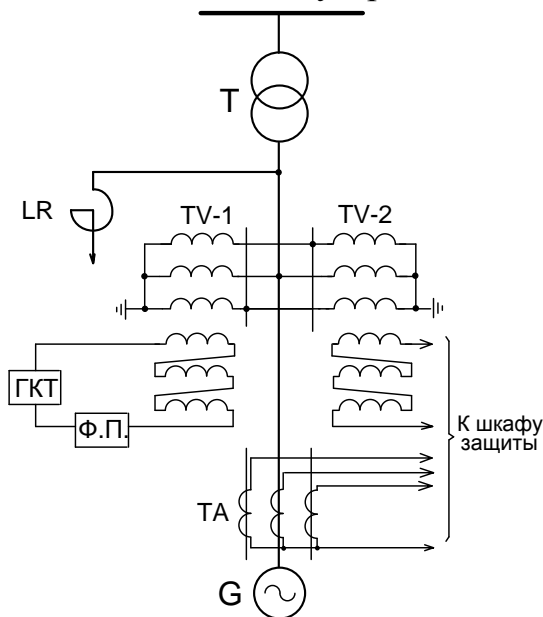


Рисунок 1 – Схема подключения элементов защиты

степени апробированным (с участием автора) вариантом решения задачи является защита с наложением тока через разомкнутый треугольник трансформаторов напряжения с частотой, отличающейся от промышленной, и его измерение с помощью фильтра нулевой последовательности на фазных трансформаторах тока (рисунок 1).

Зарубежные разработки (ABB, Siemens), в которых используется наложение тока с частотой, отличающейся от промышленной, через специальные трансформаторы, ориентированы только на решение задачи устранения зоны нечувствительности при замыкании вблизи нейтрали генераторов в блоках без гальванической связи с внешней сетью.

В работах, выполненных ранее по устройству защиты с наложением тока через трансформаторы напряжения, не исследованы процессы при дуговых перемежающихся замыканиях и, поэтому, не решена полноценно задача обеспечения её функционирования при таком виде замыкания, не рассмотрено влияние наведённого в сети напряжения с частотой контрольного тока на защиты нулевой последовательности элементов сети, питающейся от генератора блока.

Для такого варианта выполнения защиты также требуется разработка генератора контрольного тока в составе источника контрольного тока на основе использования современной элементной базы с возможностью программного управления его электрическими параметрами.

По результатам обзора и анализа опыта разработки и эксплуатации устройств защиты при различных первичных схемах соединения генераторов автор в своей работе использует известные решения частных задач, таких, например, как:

- выделение с помощью фильтра токов нулевой последовательности, составленного из фазных генераторных трансформаторов тока, малых токов низкой частоты на фоне большого тока небаланса,
- использование основных органов защит генераторов, работающих без гальванической связи с внешней сетью, в качестве пусковых органов.

Во второй главе приводятся результаты исследований и разработки источника контрольного тока (ИКТ) с электронным управляемым генератором контрольного тока (ГКТ) с частотой 25 Гц.

ГКТ включается в цепь основных вторичных обмоток трансформатора напряжения, соединённых в разомкнутый треугольник через фильтр присоединения (ФП) в виде последовательно-соединённых линейного дросселя и конденсатора $L_{пр} - C_{пр}$, настроенных в резонанс на частоте 25 Гц. При этом цепь присоединения имеет минимальное и чисто активное сопротивление на частоте 25 Гц ($R_{пр}$) и большое индуктивное на частоте 50 Гц. Параметры цепи присоединения выбраны так, что при замыкании на землю, во-первых, действующее значение тока в обмотках трансформатора напряжения не превышает значение, определяемое по его максимальной мощности и, во-вторых, сильно ограничивается ток с частотой 50 Гц.

Используемый в настоящее время в качестве ГКТ электромагнитный параметрический делитель частоты имеет неоправданно большие габариты и вес и не приспособлен для гибкого управления его электрическими параметрами с помощью современных средств.

При разработке электронного ГКТ учитывается, что он включается через фильтр с высокой добротностью, настроенный в резонанс на частоте 25 Гц. Это позволяет принять простейшую форму напряжения ГКТ в виде разнополярных прямоугольных импульсов по рисунку 2.

Разложение напряжения ГКТ в ряд Фурье имеет вид

$$U_{ГКТ}(t) = \frac{4U_{\Pi}}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \cos(k\alpha) \cos(k\omega_1 t), \quad (1)$$

где U_{Π} - амплитуда прямоугольного импульса напряжения, k - номер гармоники.

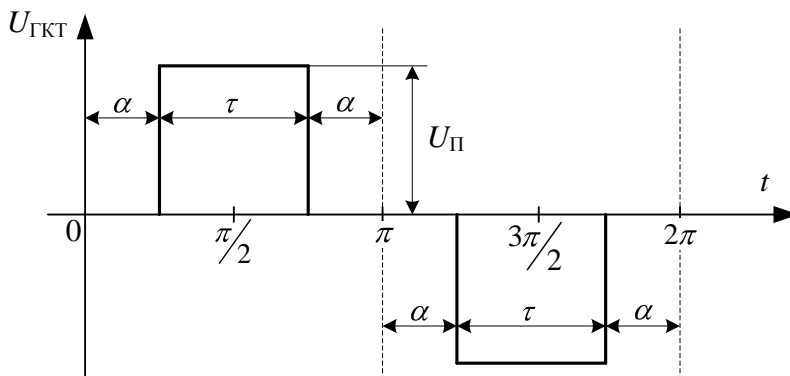


Рисунок 2 – Форма напряжения генератора контрольного тока

в случае через переходное сопротивление R_{Π} , определяются по схеме замещения

Изменение амплитуды основной гармоники ($k = 1$) можно осуществлять изменением ширины импульсов τ .

Электрические величины нулевой последовательности как в нормальном режиме, так и при устойчивом замыкании, в общем

(рисунок 3), на которой все параметры и электрические величины приведены к ступени высокого напряжения.

Токи намагничивания трансформатора напряжения при его использовании в режиме максимальной мощности относительно малы и их можно не учитывать. Вольтамперные характеристики остальных элементов схемы линейны и, поэтому электрические величины под действием напряжения ГКТ и под действием фазного напряжения могут определяться независимо.

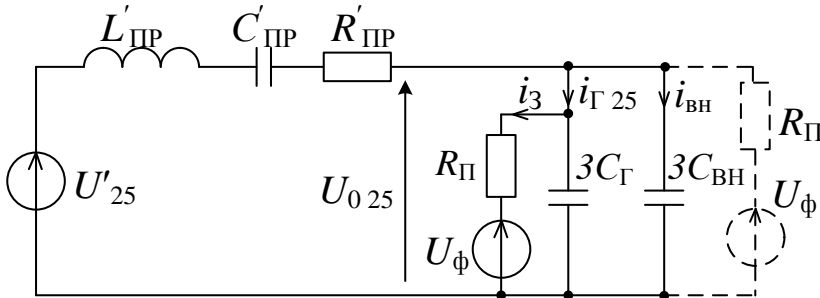


Рисунок 3 – Схема замещения для определения электрических величин при устойчивом замыкании. (Пунктиром показано место подключения переходного сопротивления при внешнем замыкании)

Источник контрольного тока работает непрерывно и поэтому в сети в нормальном режиме наводится напряжение нулевой последовательности (U_{025}) с частотой 25 Гц. Влияние этого напряжения на работу реле или других приборов, подключённых к разомкнутым тре-

угольникам трансформаторов напряжения в гальванически связанной сети, зависит от его значения по отношению к составляющей напряжения нулевой последовательности с частотой 50 Гц (U_{050}). Напряжения U_{025} определяется соотношением:

$$U_{025} = \frac{U'_{25} \cdot R_{\Pi}}{R'_{\text{пр}} + R_{\Pi} + j\omega R'_{\text{пр}} \cdot R_{\Pi} \cdot 3(C_{\Gamma} + C_{\text{ВН}})}, \quad (2)$$

а U_{050} с учётом того, что сопротивление цепи присоединения на частоте 50 Гц значительно больше ёмкостного сопротивления сети, соотношением:

$$U_{050} = \frac{U_{\phi}}{1 + j2R_{\Pi} \cdot 3(C_{\Gamma} + C_{\text{ВН}})}.$$

При анализе влияния напряжения с частотой 25 Гц принимается во внимание, что измерительные органы, реализуемые непосредственно в составе шкафа защиты генератора в зависимости от их назначения могут быть выполнены с фильтрами, выделяющими либо 25 Гц, либо 50 Гц. Реле напряжения нулевой последовательности, используемые в сети, от составляющей с частотой 25 Гц не отстроены.

Совместное рассмотрение зависимостей напряжений U_{025} и U_{050} , приведённых к масштабу дополнительных обмоток трансформатора напряжения, соединённых в разомкнутый треугольник, от переходного сопротивления (рисунок 4) при различных значениях ёмкости сети показало, что при снижении переходного сопротивления крутизна изменения напряжения с частотой 25 Гц значительно меньше, чем крутизна изменения напряжения с частотой 50 Гц. Напряжение с частотой 25 Гц начинает заметно изменяться только при относительном переходном сопротивлении $R_{\Pi*}$ менее $1,0 \div 0,8$, а при больших переходных сопротивлениях практически равно своему значению в нормальном режиме. Поэтому в худшем случае, когда $C_{\text{ВН}} = 0$, для анализа влияния напряжения с частотой 25 Гц можно принимать его максимальное значение при $R_{\Pi*} = \infty$.

Напряжение U_{025} напрямую зависит от напряжения ГКТ (2), а последнее при заданном контрольном токе пропорционально активному сопротивлению цепи присоединения $R_{пр}$ ($U_{ГКТ} = I_{25} \cdot R_{пр}$). Сопротивление $R_{пр}$ в основном определяется параметрами дросселя. Необходимость ограничения значения $R_{пр}$ определяет требования к конструкции и геометрическим размерам дросселя и сопротивлению соединительных проводов.

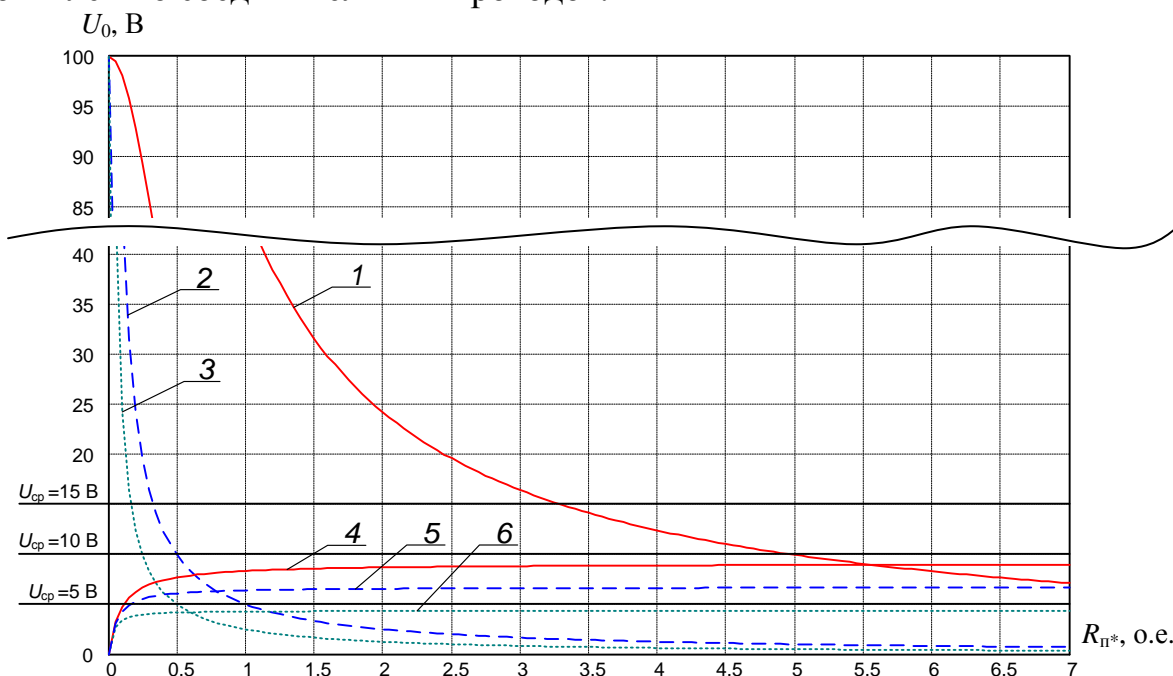


Рисунок 4 – Зависимости вторичного напряжения нулевой последовательности при замыкании через переходное сопротивление: 1, 2, 3 – с частотой 50 Гц, 4, 5, 6 – с частотой 25 Гц соответственно при $C_{Г} + C_{ВН} = 0,55, 5,5$ и 11 мкФ. (R_{π} отнесено к ёмкостному сопротивлению фаз обмотки генератора на частоте 25 Гц)

В третьей главе изложены результаты исследований, направленных на обеспечение совместимости функционирования защиты при устойчивых и при перемежающихся замыканиях.

В ряде известных устройств защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, имеющих гальваническую связь с внешней сетью и с другими генераторами, условие совместимости функционирования защиты при устойчивых и при перемежающихся замыканиях обеспечивается благодаря тому, что электрические величины соответствующих частот порождаются естественными процессами при перемежающихся замыканиях.

В данном случае используется метод наложения контрольного тока низкой частоты в электроустановках, работающих с изолированной нейтралью. Частота следования пробоев при таком режиме заземления нейтрали при перемежающихся замыканиях, как правило, не ниже удвоенной промышленной частоты, когда происходит один пробой на каждом полупериоде напряжения на повреждённой фазе. Может иметь место и несколько пробоев на полупериод при низких пробивных напряжениях. При таких условиях естественные токи и напряжения не содержат низкочастотные составляющие. Если дуга гаснет при прохождении через ноль переходного ёмкостного тока, то время замкнутого состояния цепи, в которой действует ГКТ, в десятки раз меньше периода напря-

жения ГКТ. Ток в месте замыкания представляет собой короткие импульсы, амплитуда которых пропорциональна пробивному напряжению, а наличие в токе небольшой составляющей с частотой 25 Гц проявляется в изменении расположения импульсов на временной оси.

Выполненные исследования позволили установить, что решающим фактором, благодаря которому в цепи замыкания формируется составляющая с частотой контрольного тока, соизмеримая с током при устойчивом замыкании, является наличие ёмкости фаз сети между контуром, в котором включён ГКТ, и цепью замыкания (рисунок 5). Важно также и то, что постоянная времени разряда ёмкости в цепи замыкания намного меньше постоянной времени её заряда от ГКТ. Ключ K_d в схеме по рисунку 5 замыкается и размыкается в соответствии с процессами горения перемежающейся дуги. Эквивалентные параметры цепи замыкания представлены индуктивностью L_3 и активным сопротивлением R_3 .

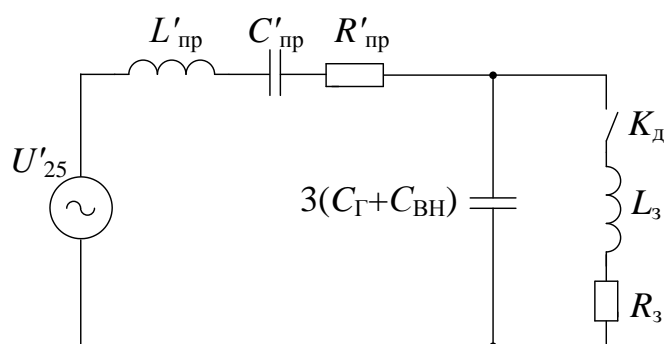


Рисунок 5 – Схема замещения для исследования процессов при перемежающихся замыканиях под действием напряжения ГКТ

Механизм формирования составляющей с частотой контрольного тока в цепи замыкания заключается в следующем.

К моменту каждого очередного пробоя изоляции ёмкость сети заряжена до некоторого напряжения u_{025} и этому соответствует запасённая энергия $\frac{Cu_{025}^2}{2}$. При пробое изоляции, что имитируется замыканием

ключом K_d , образуется контур разряда с очень малой постоянной времени. Поэтому даже при очень малом времени горения дуги ёмкость успевает разрядиться и вся энергия, запасённая к моменту пробоя, передаётся в контур цепи замыкания. В токе замыкания при этом появляются короткие импульсы тока большой амплитуды, содержащие составляющую с частотой 25 Гц.

Учитывая важность достаточно точного определения составляющей контрольного тока при перемежающихся замыканиях для выбора состава и параметров релейных измерительных органов, для исследования закономерностей формирования этой составляющей использованы различные методы: аналитические, математическое моделирование процессов в однолинейной схеме замещения и трёхфазной схеме блока совместно с моделью защиты, физическое моделирование.

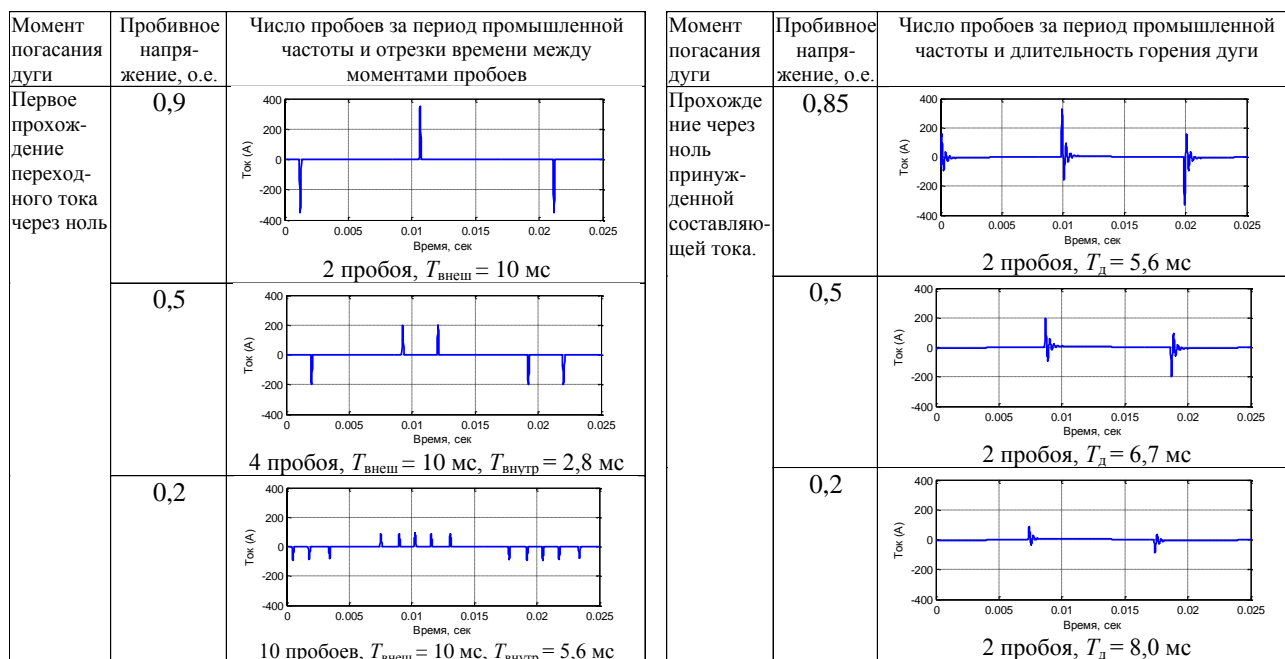
При выполнении исследований аналитически и математическим моделированием однолинейной схемы процесс формирования составляющей с частотой 25 Гц в токе замыкания рассматривается и анализируется на основе разделения процессов, вызываемых действием рабочего напряжения и действием

ГКТ. Это возможно благодаря тому, что рабочее напряжение во много раз больше напряжения ГКТ.

Учёт только действия рабочего напряжения позволяет установить моменты времени и длительность замыкания цепи, в которой действует напряжение ГКТ. Принимается, что погасание дуги может происходить при прохождении через ноль тока дозаряда ёмкостей неповреждённых фаз или принуждённой составляющей тока. Необходимые данные получены путём известного сведения трёхфазной схемы замещения к однолинейной.

Расчёты процессов, вызываемых рабочим напряжением, выполнены с использованием математической модели дугового перемежающегося замыкания, разработанной Понамаревым Е.А. и Пашковским С.Н. В этой модели предусмотрена возможность задания пробивного напряжения и момента погасания дуги. Результаты расчётов обобщены в виде таблиц. Фрагменты двух из них приведены на рисунке 6.

Изменение пробивного напряжения, когда дуга гаснет при нулевом значении переходного тока, приводит к изменению числа пробоев за полупериод напряжения промышленной частоты (рисунок 6, а), а когда дуга гаснет при нуле принуждённого тока – изменяется время горения дуги в течение полупериода (рисунок 6, б). Далее замыкание ключа K_d задаётся в соответствии с полученным числом пробоев, их расположением и длительностью.



а

б

Рисунок 6

При аналитическом исследовании принимается упрощённая схема, в которой учтены только активные сопротивления, а переменное напряжение ГКТ заменено постоянным напряжением (рисунок 7).

В качестве меры тока в цепи замыкания принято его среднее значение за некоторый постоянный отрезок времени T_0 , больший, чем время, на которое

замыкается ключ K_d . Такая замена на этапе выявления основных принципиальных закономерностей возможна в связи с тем, что аппаратное выделение низкочастотной составляющей тока, представляющего из себя импульсы, длительность которых меньше периода этой составляющей, близко к операции усреднения.

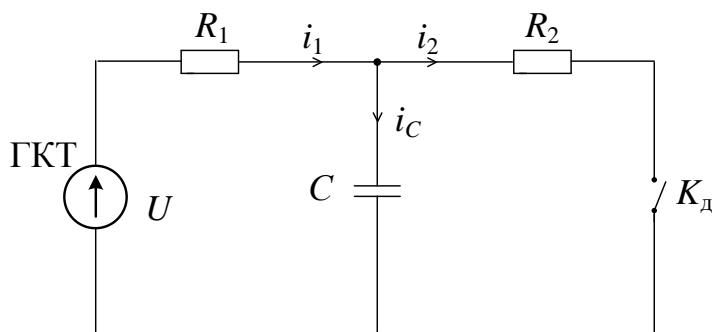


Рисунок 7 – Упрощённая схема для исследований процессов при перемежающихся замыканиях

Совместное решение дифференциальных уравнений цепи по рисунку 7 при разомкнутом и замкнутом состоянии ключа K_d с увязкой начальных условий для процессов заряда и разряда ёмкости C позволили получить зависимость среднего значения тока в цепи замыкания от параметров цепи и от за-

кономерностей замыкания ключа. Некоторые результаты представлены на рисунке 8 и рисунке 9, на которых среднее значение тока в цепи замыкания отнесено к току устойчивого замыкания (K_d постоянно замкнут).

Анализ процессов в схеме по рисунку 5 в математической модели позволяет снять ряд допущений. Параметры фильтра присоединения приняты соответствующими значениям в реализуемых практически устройствах защиты. Напряжение ГКТ принимается синусоидальной или прямоугольной формы.

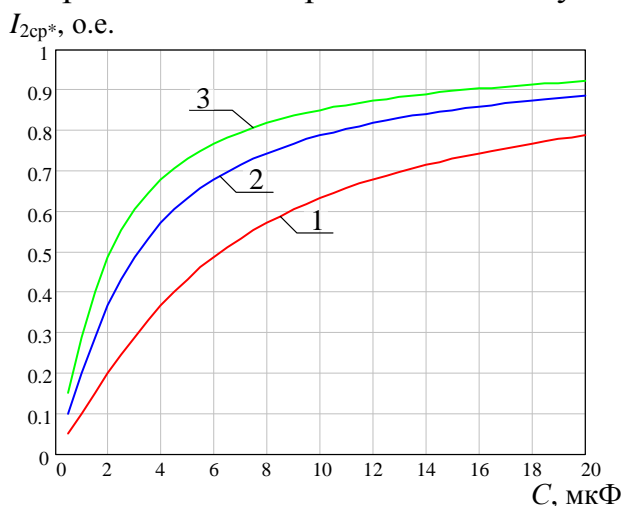


Рисунок 8 – Зависимость среднего значения тока в контуре замыкания от ёмкости сети при различном числе пробоев (n) за время T_0 : 1 – $n = 2$; 2 – $n = 4$; 3 – $n = 6$ (погасание дуги при прохождении через ноль переходного тока)

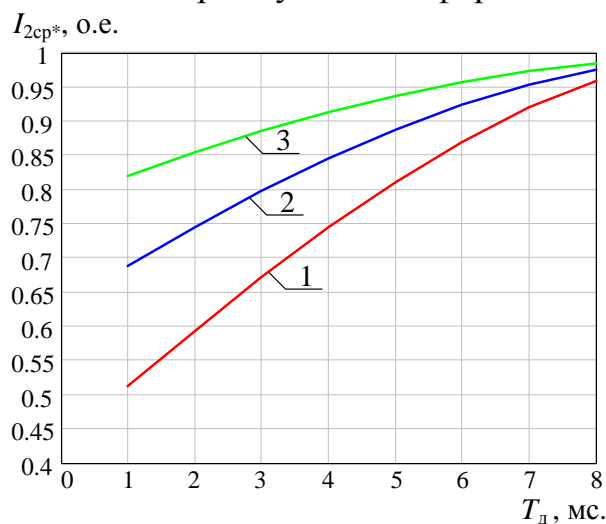


Рисунок 9 – Зависимость среднего значения тока в контуре замыкания от длительности горения дуги. 1- $C=5$ мкФ, 2- $C=10$ мкФ, 3- $C=20$ мкФ (погасание дуги при прохождении через ноль принуждённого тока)

Расчётные осциллограммы при двух пробоях на полупериод ГКТ и погасании дуги при нулевом значении переходного тока приведены на рисунке 10.

Амплитуда гармонической составляющей с частотой 25 Гц в токе замыкания по рисунку 10, б определяется разложением последовательности импульсов тока i_3 в ряд Фурье.

$$I_{25} = \sqrt{I_{25S}^2 + I_{25C}^2},$$

$$I_{25S} = \sum_{i=2}^{i=n} \frac{2}{T} \int_0^{T_d} i_{3i}(t) \cdot \sin \omega(t_i + t) dt, \quad I_{25C} = \sum_{i=2}^{i=n} \frac{2}{T} \int_0^{T_d} i_{3i}(t) \cdot \cos \omega(t_i + t) dt,$$

где I_{25S} и I_{25C} – амплитуда синусной и косинусной составляющих в токе замыкания; T и ω – соответственно период и угловая частота составляющей 25 Гц в токе замыкания; t_i – время от момента перехода через ноль напряжения ГКТ до момента очередного пробоя изоляции; T_d – время горения дуги; n – число пробоев изоляции за полупериод напряжения ГКТ ($n=2$ – минимальное число пробоев); $i_{3i}(t)$ – мгновенное значение тока в месте замыкания при i -м пробое изоляции.

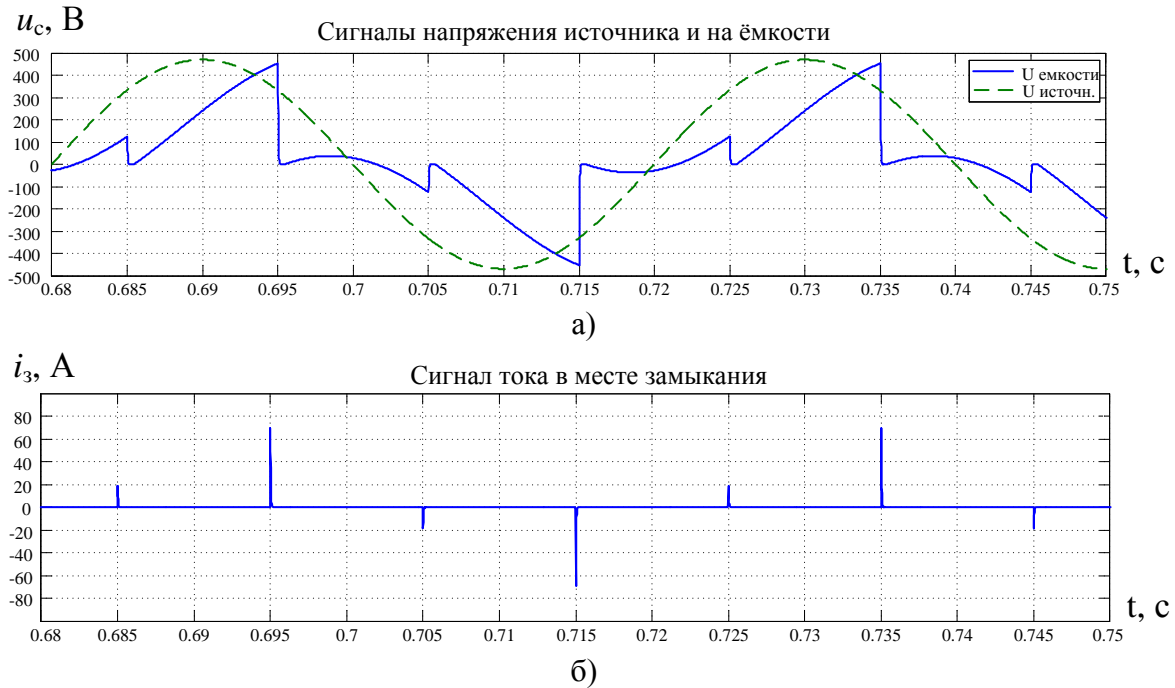


Рисунок 10 – Расчётные осциллограммы при двух пробоях за полупериод напряжения ГКТ: *а* – напряжение на ёмкости сети, *б* – ток в месте замыкания

Пределы интегрирования после каждого пробоя изоляции приняты от нуля до T_d , поскольку только в этот промежуток времени ток i_3 не равен нулю.

Так как в рассматриваемом случае $T_d \ll T$, то можно считать, что за время T_d функции $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$ практически не изменяются и принять $\sin \omega(t_i + T_d) \approx \sin \omega t_i$; $\cos \omega(t_i + T_d) \approx \cos \omega t_i$. С учётом этого обстоятельства

$$I_{25S} = \frac{2}{T} \sum_{i=2}^{i=n} \sin \omega t_i \int_0^{T_d} i_{3i}(t) dt, \quad I_{25C} = \frac{2}{T} \sum_{i=2}^{i=n} \cos \omega t_i \int_0^{T_d} i_{3i}(t) dt.$$

Учтём далее, что, *во-первых*, ток $i_3(t) = C_\Gamma + C_{ВН} \frac{du_{0,25}}{dt}$ и, *во-вторых*,

примем, что при каждом пробое изоляции напряжение $u_{0,25}$ за время T_d изменяется от значения u_i , до которого заряжается ёмкость фаз сети перед каждым пробоем, до нуля. Поэтому

$$\int_0^{T_d} i_{zi} dt = C_{\Gamma} + C_{ВН} u_i.$$

Теперь окончательно получим

$$I_{25S} = \frac{2}{T} C_{\Gamma} + C_{ВН} \sum_{i=2}^{i=n} u_i \cdot \sin \omega t_i, \quad I_{25C} = \frac{2}{T} C_{\Gamma} + C_{ВН} \sum_{i=2}^{i=n} u_i \cdot \cos \omega t_i. \quad (3)$$

Из соотношений (3) можно установить, от каких факторов зависит амплитуда тока с частотой 25 Гц. Эти факторы определённым образом связаны между собой, в частности:

1. При изменении ёмкости сети одновременно увеличивается постоянная времени её заряда, поэтому при прочих равных условиях увеличение ёмкости приведёт к снижению u_i и наоборот.
2. Увеличение числа пробоев за полупериод приводит к увеличению числа составляющих под знаком суммы, но одновременно и к снижению u_i из-за уменьшения времени между соседними пробоями изоляции.
3. Изменение фазы моментов пробоя изоляции относительно напряжения ГКТ приводит к изменению синусной и косинусной составляющей тока в противоположных направлениях.

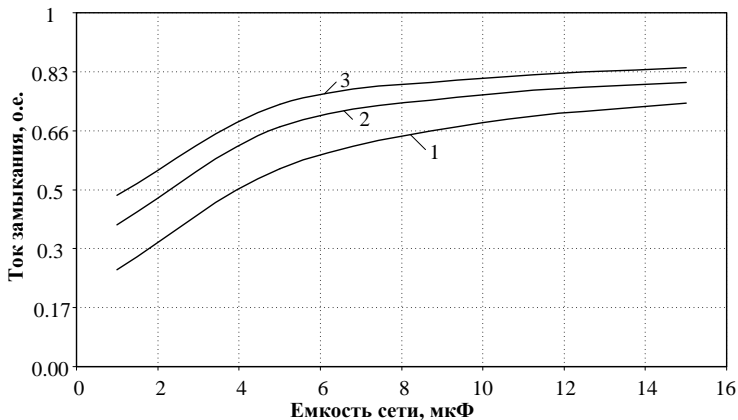


Рисунок 11 – Зависимость составляющей тока с частотой 25 Гц в цепи генератора от ёмкости внешней сети при перемежающихся замыканиях: 1, 2, 3 – соответственно при 2, 4 и 6 пробоях на полупериод напряжения ГКТ (математическая модель)

Первое и второе из приведённых положений подтверждается графиками зависимости составляющей с частотой 25 Гц в токе замыкания от ёмкости сети (рисунок 11).

Как видно, крутизна нарастания составляющей с частотой 25 Гц уменьшается как с увеличением ёмкости, так и с увеличением числа пробоев. Расчёты при значениях фазового сдвига моментов пробоев от 0 до 90° относительно напряжения ГКТ дали практически

одинаковые значения составляющей с частотой 25 Гц.

При проведении расчётов с разной шириной прямоугольных импульсов τ их амплитуда устанавливается в соответствии с (1) такой, что составляющая с частотой 25 Гц в напряжении ГКТ остаётся постоянной и равной значению, принятому при проведении расчётов с синусоидальной формой напряжения. Результаты при двух пробоях на полупериод ГКТ, погасании дуги при нулевом значении переходного тока и ёмкости сети 5 мкФ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Ширина импульса ГКТ, электрических градусов	45	90	135	180
Составляющая с частотой 25 Гц в токе замыкания, о.е.	0,463	0,456	0,457	0,455

В алгоритме действия защиты может использоваться составляющая с частотой 25 Гц в напряжении нулевой последовательности.

Результаты определения напряжения с частотой 25 Гц при перемежающихся замыканиях приведены в таблице 2 в именованных единицах и отнесённые к напряжению в нормальном режиме.

Таблица 2

Ёмкость сети, мкФ	Напряжение нулевой последовательности с частотой 25 Гц						
	Нормальный режим, В	2 пробоя		4 пробоя		6 пробоев	
		В	о.е.	В	о.е.	В	о.е.
1	448	244	0,54	200	0,45	172	0,38
5	260	143	0,55	98	0,38	76	0,29
10	160	94	0,59	60	0,37	46	0,28
15	113	71	0,63	44	0,39	33	0,30

Исследование на физической модели имеет очень большое значение, так как при этом воспроизводится естественное взаимодействие процессов, вызываемых рабочим напряжением сети и напряжением ГКТ.

Параметры модели соответствуют блоку с генератором (ТВФ-63-2, 6,3 кВ). Ёмкость трёх фаз сети, подключённой к реактору, принята равной 4,5 мкФ, а генератора 0,6 мкФ, чему соответствует ток промышленной частоты при устойчивом замыкании 5,8 А. Индуктивности фаз генератора и эквивалентных элементов сети приняты такими, чтобы частота переходного ёмкостного тока дозаряда ёмкостей неповреждённых фаз укладывалась в пределы 3–5 кГц.

В качестве источника контрольного тока в модели использовано изделие с трансформаторами напряжения ЗНОЛ.06-6, предназначенное для выполнения защиты генератора на одной из электростанций. Напряжение ГКТ снижено в соответствии с масштабом модели, который равен отношению напряжений источника питания модели (380 В) и напряжения оригинала (6300 В). Дуговое замыкание моделируется с помощью двунаправленного тиристорного ключа, управляемого схемой, обеспечивающей открытие ключа при определённом на-

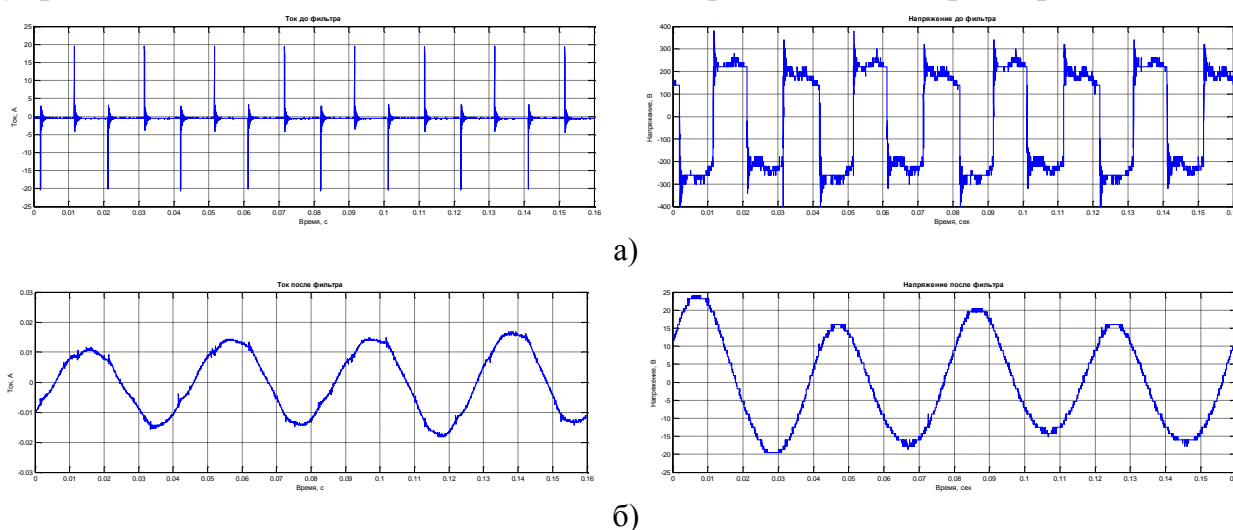


Рисунок 12 – Внутреннее перемежающееся замыкание при одном пробое на полупериод промышленной частоты, а – ток нулевой последовательности в цепи генератора и напряжение нулевой последовательности до фильтра, б – то же после частотного фильтра.
(Приведено к масштабу первичных электрических величин физической модели)

пряжении на повреждённой фазе и его закрытие в задаваемый момент перехода тока через ноль.

Примеры из серии осциллограмм процессов, полученных на физической модели, представлены на рисунке 12.

Значения составляющей тока в цепи генератора и напряжения нулевой последовательности, полученные на физической модели при внутренних перемежающихся замыканиях, приведены в таблице 3. Токи отнесены к его значению при устойчивом замыкании, а напряжения – к его значению в нормальном режиме. При внешних перемежающихся замыканиях ток с частотой 25 Гц в цепи генератора не превышает 8 % от тока при устойчивом замыкании, а напряжение при внешнем замыкании получается практически таким же, как и при внутреннем.

Таблица 3

Число пробоев на полупериод напряжения ГКТ, шт.	2 пробоя	4 пробоя	6 пробоев	8 пробоев
Составляющая тока с частотой 25 Гц в цепи генератора, о.е.	0,55	0,72	0,78	0,843
Составляющая напряжения нулевой последовательности с частотой 25 Гц, о.е.	0,57	0,418	0,32	0,27

Результаты исследования процессов при перемежающихся замыканиях, выполненные различными методами, дали достаточно близкие результаты. Сопоставление составляющей с частотой 25 Гц в токе замыкания при $n=2$ и $C_r+C_{вн}$ около 5 мкФ, полученной различными методами, приведено в таблице 4.

Таблица 4

Метод исследования	На физической модели	Аналитическое исследование по упрощённой схеме	В однолинейной схеме замещения (мат. модель)	В полной трёхфазной схеме (мат. модель)
Составляющая с частотой 25 Гц в токе замыкания, о.е.	0,55	0,43	0,56	0,5

В **четвертой** главе рассматриваются элементы технической реализации защиты.

Принцип, на основании которого обеспечивается селективность действия защиты при устойчивом замыкании, ясен из схемы замещения по рисунку 3. Ток с частотой 25 Гц в цепи генератора при внутреннем и внешнем замыкании и в нормальном режиме соответственно равен:

$$i_{r25}^{внт} = \frac{U'_{25} \cdot 1 + j\omega \cdot 3C_r \cdot R_{п}}{R'_{пр} + R_{п} + j\omega R'_{пр} \cdot R_{п} \cdot 3(C_r + C_{вн})}, \quad i_{r25}^{внш} = \frac{U'_{25} \cdot j\omega \cdot 3C_r \cdot R_{п}}{R'_{пр} + R_{п} + j\omega R'_{пр} \cdot R_{п} \cdot 3(C_r + C_{вн})},$$

$$i_{r25}^{нрм} = \frac{U'_{25} \cdot j\omega \cdot 3C_r}{1 + j\omega R'_{пр} \cdot 3(C_r + C_{вн})}, \text{ а напряжение вычисляется по (2).}$$

В нормальном режиме ($R_{п} = \infty$) наибольшее значение тока имеет место при отключении отпайки ($C_{вн}=0$). Например, при использовании защиты для генератора ТВФ-63-2, у которого ёмкость $3C_r$ составляет около 0,6 мкФ, ток в нормальном режиме в этом случае меньше 0,1 от тока при металлическом за-

мыкании. При $R_{\Pi} \rightarrow 0$ и внешнем замыкании ток $\dot{I}_{r25} \rightarrow 0$, при внутреннем стремится к своему максимальному значению $\dot{I}_{r25} = \frac{U'_{25}}{R'_{\Pi P}}$, а напряжение U_{025} - к нулю. Последнее используется в качестве одного из пусковых признаков.

На основе результатов исследования электрических величин при устойчивых и перемежающихся замыканиях в защите предусматриваются следующие основные релейные измерительные органы: избирательный орган, реагирующий на увеличение тока нулевой последовательности с частотой 25 Гц в цепи генератора (I_{r25}); пусковой орган, реагирующий на появление напряжения нулевой последовательности с частотой 50 Гц; пусковой орган, реагирующий на снижение напряжения нулевой последовательности с частотой 25 Гц.

Наиболее типичным случаем применения защиты является использование её в блоках с генератором ТВФ-63-2. Максимальный первичный контрольный ток составляет 0,3 – 0,32 А, а при коэффициенте трансформации трансформаторов тока 8000/5 максимальный вторичный контрольный ток равен 0,187-0,2 мА.

Опыт выполнения защиты с наложением тока показывает, что может быть надёжно выделен и измерен весьма малый ток с частотой 25 Гц. Это подтверждено осциллографированием электрических величин на объектах, где применена защита. Так, например, в блоке Ново-Рязанской ТЭЦ с генератором ТВФ-63-2 в нормальном режиме расчётное значение вторичного тока с частотой 25 Гц в цепи генератора составляет 0,022 мА, а выделенное фильтрами защиты и измеренное цифровым осциллографом – 0,021-0,022 мА.

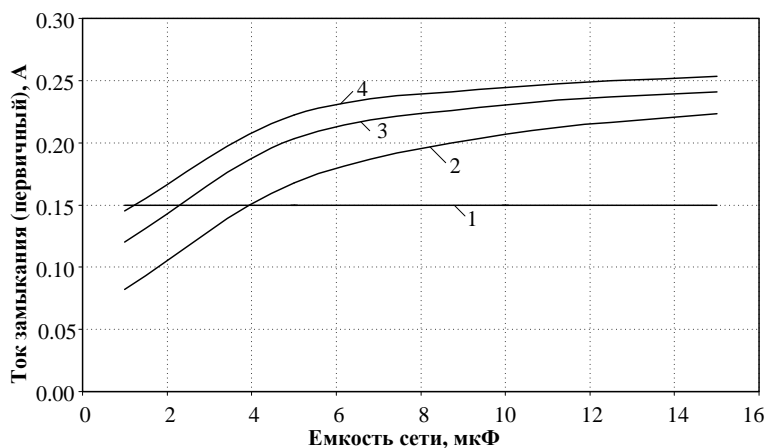


Рисунок 13 – Оценка чувствительности защиты по току 25 Гц при перемежающихся замыканиях: 1 – ток срабатывания, 2, 3, 4 – ток соответственно при 2, 4 и 6 пробоях на полупериод напряжения ГКТ

Как видно, чувствительность защиты по току в худшем случае, когда имеет место 2 пробоя за полупериод, обеспечивается при ёмкости внешней сети более 4 мкФ.

Для снижения составляющей с частотой 25 Гц на разомкнутых треугольниках трансформаторов напряжения, установленных в сети, питающейся от ре-

Вторичный ток срабатывания избирательного органа принят равным 0,1-0,08 мА (0,16-0,128 А первичных). При этом коэффициент чувствительности при устойчивом замыкании получается равным около двух.

На рисунке 13 сопоставлены значения составляющей 25 Гц в цепи генератора при перемежающихся замыканиях с принятым током срабатывания.

актора, может быть предусмотрено два режима работы источника контрольного тока: режим ожидания, при котором напряжение ГКТ снижено, и форсированный режим, в котором при возникновении замыкания напряжение ГКТ увеличивается. Перевод ГКТ в форсированный режим также как и пуск защиты осуществляется по факту появления напряжения нулевой последовательности с частотой 50 Гц и снижения с частотой 25 Гц. Напряжение срабатывания по частоте 50 Гц принимается в пределах 5-10 В, а напряжение срабатывания по частоте 25 Гц отстраивается от его значения в нормальном режиме. На рисунке 14 сопоставлены значения напряжения с частотой 25 Гц при перемежающихся замыканиях с напряжением срабатывания, рассчитанным при максимальной ёмкости 8 мкФ (условия Ново-Рязанской ТЭЦ). Чувствительность пусковых органов по напряжению с частотой 25 Гц обеспечивается при минимальном числе пробоев

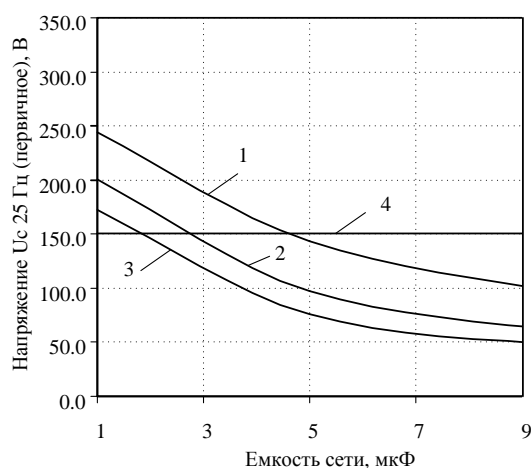


Рисунок 14 – Оценка чувствительности пускового органа по напряжению 25 Гц при перемежающихся замыканиях: 1, 2 и 3 напряжение при 2, 4 и 6 пробоях за полупериод ГКТ; 4 – напряжение срабатывания

и возможным в эксплуатации снижении ёмкости сети примерно до 4 мкФ.

При оценке чувствительности пусковых органов по напряжению с частотой 25 Гц важно иметь ввиду, что они дублируются пусковым органом по напряжению с частотой 50 Гц, который надёжно работает как при устойчивых так и при перемежающихся замыканиях в пределах не менее 90% витков обмотки статора. Поэтому основным назначением пусковых органов по напряжению с частотой 25 Гц является пуск форсировки ГКТ и защиты при замыкании в зоне 10% витков от нейтрали, в пределах которой перемежающееся замыкание маловероятно, так как напряжение, приложенное к изоляции здесь невелико.

Выполнено исследование функционирования защиты на математической модели. Модель включает в себя: модель первичной сети блока с фильтрами нулевой последовательности тока и напряжения; модель источника контрольного тока с ГКТ и управлением шириной импульсов напряжения прямоугольной формы; модель перемежающегося дугового замыкания; модели частотных фильтров с преобразованием выделенных величин в действующие значения; модели релейных измерительных органов с логическими связями их дискретных выходных сигналов.

На модели выполнены расчётные эксперименты при устойчивых и перемежающихся замыканиях.

Во всех режимах зафиксирована правильная работа защиты. Для примера на рисунке 15 приведены фрагменты расчётных осциллограмм некоторых элек-

трических величин при внутреннем и внешнем устойчивом и перемежающемся замыкании, а также при устойчивом замыкании в нейтрали.

Изменение составляющих тока и напряжения с частотой 25 Гц согласуются с результатами, полученными при исследовании электрических процессов в предыдущих разделах работы.

В заключительной части работы рассмотрены особенности применения защиты при высокоомном резистивном заземлении нейтрали и показана принципиальная возможность её усовершенствования введением дополнительного органа тока нулевой последовательности промышленной частоты с отстройкой от тока небаланса путём формирования приращения вектора тока на выходе фильтра нулевой последовательности.

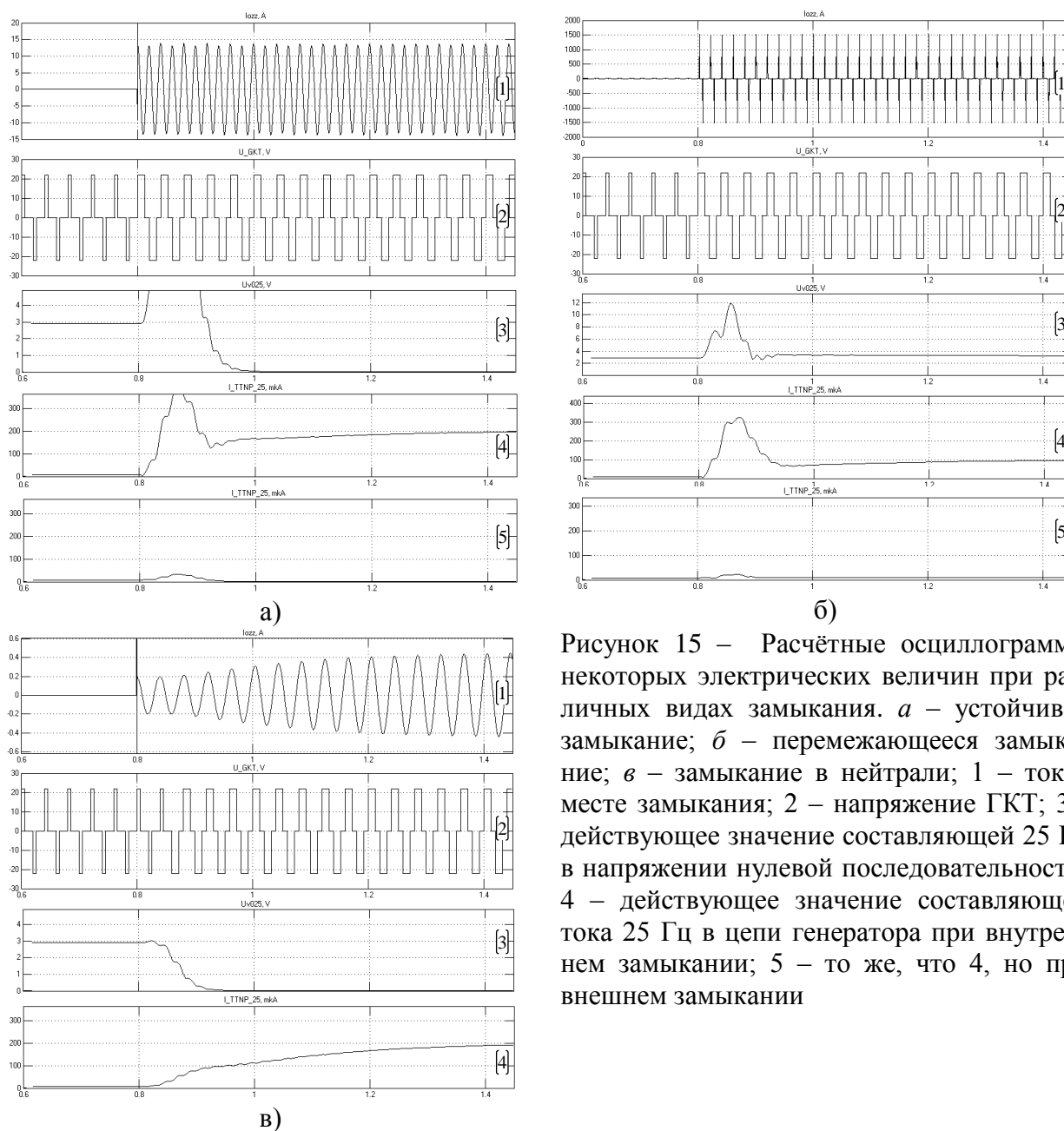


Рисунок 15 – Расчётные осциллограммы некоторых электрических величин при различных видах замыкания. *а* – устойчивое замыкание; *б* – перемежающееся замыкание; *в* – замыкание в нейтрали; 1 – ток в месте замыкания; 2 – напряжение ГКТ; 3 – действующее значение составляющей 25 Гц в напряжении нулевой последовательности; 4 – действующее значение составляющей тока 25 Гц в цепи генератора при внутреннем замыкании; 5 – то же, что 4, но при внешнем замыкании

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа известных методов выполнения и устройств защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов обоснован выбор способа выполнения защиты в блоках с реактированной отпайкой и определены задачи, которые должны быть решены для разработки защиты, удовлетворяющей современным требованиям.

2. Разработаны требования к электронному генератору контрольного тока, включаемого в цепь разомкнутого треугольника трансформаторов напряжения. Исходя из условий обеспечения его управляемости, достаточной технологической простоты при изготовлении и надёжности.

3. Показано, что параметры элементов источника контрольного тока должны выбираться исходя не только из допустимого значения тока в обмотках трансформатора напряжения, но и из условия возможного снижения напряжения с частотой контрольного тока, наводимого в сети в нормальном режиме.

4. Выполнены экспериментальные исследования источника контрольного тока с электронным генератором с имитацией возможных режимов его работы, которые показали достаточную эффективность принятых решений.

5. Показано, что при перемежающихся замыканиях в сети с изолированной нейтралью при включении источника через трансформаторы напряжения в токе замыкания формируется достаточно большая составляющая с частотой контрольного тока благодаря тому, что ёмкость фаз сети в цикле зажигания и погасания дуги является средством накопления и передачи энергии от генератора контрольного тока в цепи замыкания.

6. На основе исследований процессов при перемежающихся замыканиях аналитическим методом, методом компьютерного моделирования и на физической модели определены граничные условия и параметры сети блока, при которых формируется достаточная для работы защиты составляющая контрольного тока.

7. Установлено, что основными факторами, влияющими на значение составляющей с частотой контрольного тока при перемежающихся замыканиях, являются ёмкость фаз внешней сети, связанной гальванически с цепями статора генератора, и число пробоев изоляции за полупериод напряжения источника контрольного тока.

8. Определён состав основных и вспомогательных (блокирующих) релейных измерительных органов защиты и логические связи между их дискретными выходами.

9. Разработана методика расчёта параметров срабатывания релейных измерительных органов защиты.

10. Подтверждена правильность функционирования защиты при устойчивых замыканиях, включая нейтраль генератора, и при перемежающихся замыканиях на математической модели, включающей в себя модель сети блока генератор - трансформатор и полную модель защиты.

11. Показана принципиальная возможность выполнения защиты с наложением контрольного тока через трансформаторы напряжения в случае при-

менения в сети блока с высокоомного резистивного заземления нейтрали и возможность её усовершенствования введением дополнительного органа тока промышленной частоты с отстройкой от тока небаланса путём формирования приращения вектора тока на выходе фильтра нулевой последовательности.

12. Результаты исследований использованы при разработке шкафа источника контрольного тока ШНЭ1150(А) и при вводе в работу защиты генераторов в составе шкафов типа ШЭ111Х на Ново-Рязанской ТЭЦ, Ново-Иркутской ТЭЦ, Новокуйбышевской ТЭЦ-1 и других электростанциях.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Функционирование защиты обмотки статора генератора от замыканий на землю с наложением контрольного тока через трансформатор напряжения при перемежающихся замыканиях / **Доронин А. В.** // Известия Томского политехнического университета.– 2012 т. 321 № 4.– С. 61-66.

2. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов в схеме блоков с реактированной отпайкой / Вайнштейн Р. А., **Доронин А. В.**, Наумов А. М., Юдин С. М. // Известия высших учебных заведений (вузов). Электромеханика.– 2011 № 6.– С. 98-101.

3. Особенности применения защит от замыканий на землю обмотки статора генератора / **Доронин А. В.**, Наумов А. М. // Энергетик.– 2007 № 3.– С. 32-34.

4. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов на электростанциях ОЭС Сибири / Вайнштейн Р.А., Лапин В.И., Наумов А.М., **Доронин А.В.**, Юдин С.М. // Электрические станции. - 2009 № 12. С. 26-30.

5. Защита от замыканий на землю обмоток статоров генераторов, работающих на общие шины / Вайнштейн Р. А., Понамарев Е. А., **Доронин А. В.**, Наумов А. М., Наумов В.А. // Энергетик.– 2009 № 1.– С. 39-40.

6. О возможности выполнения защиты от замыканий на землю на основе формирования приращения тока на выходе фильтра нулевой последовательности / Вайнштейн Р.А., **Доронин А. В.**, Понамарев Е. А., Шестакова В. В. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.– 2008.– С. 98-102.

7. Особенности реализации защит генераторов-двигателей гидроаккумулирующей станции / Наумов В. А., **Доронин А. В.** // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.– 2009.– С. 177-180.– русский; рез. английский

8. Опыт разработки и применения защиты от замыканий на землю обмотки статора на основе наложения постоянного тока в составе комплексной цифровой защиты генераторов / Вайнштейн Р.А., **Доронин А.В.**, Наумов А.М., Юдин С.М. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010 № 3-4/1. С.135-139

Патент

9. Устройство для защиты от замыканий на землю обмотки статора генератора : пат. 2358369 Рос. Федерация : МПК H02H 3/16, H02H 7/06 / Шестакова В.В., Вайнштейн Р.А., Юдин С.М., **Доронин А.В.**; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский политехнический университет (RU). - № 2008130018/09 ; заявл. 21.07.2008 ; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 16

Публикации в других изданиях

10. Защита от замыканий на землю обмотки статора генераторов, работающих на общие шины / Томский политехнический университет; Р.А. Вайнштейн, С.М. Юдин / ООО НПП «ЭКРА»; **А.В. Доронин**, А.М. Наумов, В.А. Наумов // Релейная защита и автоматика современных энергосистем сверхвысокого напряжения: Сборник трудов Международной научно-практической конференции и выставки РНК СИГРЭ (9-13 сентября) – Чебоксары, 2007

11. Применение адаптированных вейвлетов к анализу специализированных сигналов / Доронина Е. М., **Доронин А. В.** // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: ДНДС 2007: Материалы 7 Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 2007. – С. 136-138.
12. Новые разработки шкафов защит и автоматики станционного оборудования производства НПП «ЭКРА» / ООО НПП «ЭКРА»; А.М. Наумов, В.А. Наумов, **А.В. Доронин** / Томский политехнический университет; Р.А. Вайнштейн // Релейная защита и автоматика энергосистем - 2008: Сборник докладов 18-ой Всероссийской научно-технической конференции (27–30 мая) – Москва, 2008.
13. Protection from ground faults in the stator winding of generators at power plants in the Siberian Networks / Vainshtein R.A., Yudin S.M., Lapin V.I., Naumov A.M., **Doronin A.V.** // Power Technology and Engineering. - 2010. Т. 44. № 1. С. 79-82.
14. Шкафы защит и автоматики генераторов, трансформаторов и блоков генератор-трансформатор типов ШЭ1110...ШЭ1113 / **А.В. Доронин**, В.А. Наумов // Релейная защита и автоматика энергосистем - 2010: Сборник докладов 20-ой Всероссийской научно-технической конференции (1 – 4 июня) – Москва, 2010. - С.161-165.
15. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов при различных первичных схемах / Вайнштейн Р. А., Юдин С. М., **Доронин А. В.**, Наумов А. М. // Релейная защита и автоматизация.– 2012 № 1.– С. 32-37.
16. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов при различных первичных схемах / Томский политехнический университет; Р.А. Вайнштейн, С.М. Юдин / ООО НПП «ЭКРА»; **А.В. Доронин**, А.М. Наумов // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России (РЕЛАВЭКСПО-2012): Сборник трудов Международной научно-практической конференции и выставки (17-20 апреля) – Чебоксары, 2012 – С.26-29.
17. К вопросу о земляных защитах и учете ПДЗ / Вайнштейн Р., **Доронин А.** // Новости электротехники.– 2012 № 2.– С. 68.
18. Обзор средств для испытания защит от замыканий на землю в реальном времени / **Доронин А. В.**, Пашковский С. Н., Пономарев Е. А. // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2012): Материалы 8 Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 2012.– 2012.– С. 263-265.