

На правах рукописи



АЛЬ-ХОМИДИ Марван Саид Саиф

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ ЙЕМЕН**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново - 2016

Работа выполнена на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Шуин Владимир Александрович

Официальные оппоненты: **Куликов Александр Леонидович**,
доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»

Наволочный Александр Альбертович,
кандидат технических наук, ОАО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством», руководитель Центра моделирования электроэнергетических систем

Ведущая организация: АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей «Энергосетьпроект», г. Москва

Защита состоится 16 июня 2016 г. в 11.00 на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый Совет ИГЭУ.

Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Al_Homidi.pdf.

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ <http://ispu.ru/>

Автореферат разослан _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент

Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Разработанный по заданию национальной энергетической компании (Office National de L'Electric ale) Республики Йемен (РЙ) проект развития электроэнергетики предусматривает до 2025 г. электрификацию 40 тыс. населённых пунктов по всей территории страны и рост электропотребления в городах Йемена в 2-3 раза по сравнению с 2010 г. Удовлетворить указанный рост электропотребления во всех регионах страны в перспективе до 2025 г. планировалось за счет сооружения и постепенного увеличения мощности современной парогазовой электростанции (ПГЭС) Marib, расположенной на северо-востоке страны, и развития электрической сети сверхвысокого напряжения (СВН) 400 кВ, связывающей ПГЭС с основными центрами электропотребления на севере и юге страны. Однако в условиях нестабильности в последние годы политической и экономической обстановки в РЙ реализовать полностью планы развития генерации и электрических сетей СВН не удалось. В то же время продолжающийся рост электропотребления, прежде всего, в городах РЙ, обусловил снижение уровней напряжения в узлах системообразующей электрической сети ЭЭС РЙ напряжением 132 кВ, уменьшение запасов статической и динамической устойчивости, ухудшение качества электроэнергии у потребителей. Сложившиеся в настоящее время режимы работы ЭЭС РЙ не удовлетворяют в полной мере основным требованиям, определяющим эффективность ее функционирования: режимной надежности, бесперебойности электроснабжения потребителей, высокого качества электроэнергии, экономичности.

На эффективность работы ЭЭС РЙ и надежность электроснабжения потребителей существенное влияние оказывает эффективность функционирования релейной защиты (РЗ) электрических сетей. Трудности возникают, в частности, с обеспечением требуемой чувствительности дистанционных защит (ДЗ) ЛЭП системообразующей электрической сети 132 кВ при коротких замыканиях (КЗ) в зоне дальнего резервирования – на стороне низшего напряжения понизительных подстанций 132/11 кВ.

Большая часть электрической энергии распределяется потребителям систем городского и промышленного электроснабжения через распределительные кабельные сети напряжением 11 кВ, работающие, как правило, с изолированной нейтралью. В таких сетях преобладающим видом повреждений являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), которые из-за низкой эффективности работы защиты от данного вида повреждений часто являются причиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом.

Поэтому исследования и разработки, направленные на повышение эффективности функционирования электрических сетей и релейной защиты ЭЭС РЙ, и повышение на этой основе надежности электроснабжения потребителей актуальны.

Целью работы является повышение эффективности функционирования электрических сетей и релейной защиты ЭЭС РЙ.

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

- 1) анализ современного состояния и перспектив развития ЭЭС РЙ;
- 2) разработка математической имитационной модели системообразующей электрической сети 132 кВ ЭЭС РЙ для исследования установившихся режимов ее работы;

3) исследование установившихся режимов работы сети 132 кВ ЭЭС РЙ для разработки методов повышения эффективности ее функционирования;

4) разработка аналитической и имитационных математических моделей для исследования эффективности дальнего резервирования ДЗ на ЛЭП 132 кВ ЭЭС РЙ;

5) исследование причин недостаточной эффективности дальнего резервирования ДЗ от междуфазных КЗ на ЛЭП 132 кВ ЭЭС РЙ и разработка методов ее повышения;

6) исследование особенностей влияния переходных процессов при дуговых перемежающихся однофазных замыканиях на землю (ДПОЗЗ) в распределительных кабельных сетях среднего напряжения на работу микропроцессорных исполнений токовых защит нулевой последовательности (ТЗНП) и разработка рекомендаций по повышению динамической устойчивости их функционирования.

Основные методы научных исследований. Решение поставленных задач базируется на использовании методов теории электрических цепей и электромагнитных установившихся и переходных процессов в электрических сетях, методов математического моделирования электроэнергетических объектов и устройств автоматического управления ими.

Научную новизну и значимость полученных результатов, по мнению автора, представляют:

1) математическая имитационная модель для расчета установившихся режимов работы системообразующей электрической сети напряжением 132 кВ, достоверность и точность которой подтверждена сопоставлением результатов расчетов на модели с параметрами реальных режимов ЭЭС РЙ за 2010-2012 гг.;

2) результаты анализа установившихся режимов системообразующей электрической сети 132 кВ, позволяющие обосновать мероприятия по повышению статической устойчивости ЭЭС РЙ и качества электроэнергии у потребителей в перспективе до 2020 г.;

3) методика выбора мест размещения и мощности компенсирующих устройств, основанная на использовании приближенного решения задачи по уравнениям, связывающим приращения напряжения в рассматриваемом узле к изменению мощности компенсирующего устройства в узле включения последнего и последующем уточнении приближенного решения с использованием имитационной модели сети;

4) математические аналитическая и имитационные модели для исследования эффективности функционирования дальнего резервирования дистанционными защитами ЛЭП 132 кВ ЭЭС РЙ при КЗ за трансформаторами "звезда-треугольник" с учетом основных влияющих факторов;

5) рекомендации по уточнению методики выбора уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП по условиям требуемой чувствительности к коротким замыканиям за трансформатором с соединением обмоток "звезда-треугольник", основанные на приближенном аналитическом решении задачи и возможности его уточнения с использованием имитационной модели;

6) методика оценки чувствительности микропроцессорных исполнений токовых защит нулевой последовательности не только при устойчивых, но и при наиболее опасных для сети ДПОЗЗ, основанная на использовании расчетных значений коэффициентов, полученных на имитационных моделях кабельных сетей с изолированной нейтралью.

Практическую ценность имеют:

1) результаты исследований на математической имитационной модели установившихся режимов работы электрической сети 132 кВ ЭЭС РЙ и разработанные на их основе меры для повышения статической устойчивости ЭЭС РЙ и качества электроэнергии у потребителей на период до 2020 г.;

2) математическая имитационная модель электрической сети 132 кВ ЭЭС РЙ, которая может быть использована для расчетов установившихся режимов работы в проектных и эксплуатационных целях;

3) рекомендации по уточнению методики выбора уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП по условиям требуемой чувствительности к коротким замыканиям за трансформатором с соединением обмоток "звезда-треугольник", которые могут быть использованы в проектных организациях;

4) рекомендации по уточнению методики выбора уставок цифровых исполнений токовых защит нулевой последовательности кабельных сетей среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, которые могут быть использованы проектными и эксплуатирующими организациями.

Достоверность результатов исследований определяется корректностью принятых допущений, использованием методов классической теории электрических цепей и теории электромагнитных переходных процессов в ЭЭС; в части исследований режимов работы электрической сети 132 кВ ЭЭС РЙ – сходимостью результатов расчетов на модели с параметрами реальных режимов, измеренными в 2010 и 2012 гг.; в части результатов исследований дистанционных защит ЛЭП 132 кВ и токовых защит от ОЗЗ кабельных сетей среднего напряжения – сходимостью аналитических расчетов с результатами, полученными на имитационных математических моделях, и с результатами исследований других авторов, опубликованными в литературных источниках.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»: в диссертационной работе объектами исследований являются электрические сети высокого 132 кВ и среднего напряжения 11 кВ ЭЭС РЙ, предметом исследований – режимы работы электрической сети 132 кВ и способы повышения эффективности ее функционирования, способы повышения технического совершенства дистанционных защит от междуфазных КЗ ЛЭП электрической сети 132 кВ и токовых защит от ОЗЗ кабельных сетей напряжением 11 кВ.

Соответствие диссертации области исследования специальности: отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы», а именно:

– п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 – «Электростанции и электроэнергетические системы» (технические науки) соответствуют разработки математической имитационной модели для исследований установившихся режимов работы электрической сети 132 кВ ЭЭС РЙ, математических аналитической и имитационной моделей для исследований эффективности дальнего резервирования резервных ступеней ДЗ, имитационной математической модели кабельной сети 11 кВ для исследований переходных процессов при ОЗЗ и динами-

ческих режимов функционирования микропроцессорных исполнений ТЗНП от данного вида повреждений при ДПОЗЗ;

– п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют исследования с использованием аналитической и имитационной моделей эффективности функционирования и разработка рекомендаций по повышению чувствительности резервных ступеней ДЗ при КЗ за трансформаторами с группой соединения обмоток "звезда-треугольник" и исследования с использованием имитационной модели условий обеспечения динамической устойчивости микропроцессорных исполнений ТЗНП кабельных сетей среднего напряжения с изолированной нейтралью при ДПОЗЗ.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационных исследований планирует использовать национальная энергетическая компания РЙ (Office National de L'Electric ale).

Основные положения, выносимые на защиту:

1) математическая имитационная модель для расчета установившихся режимов работы системообразующей электрической сети напряжением 132 кВ ЭЭС РЙ;

2) результаты исследований установившихся режимов системообразующей электрической сети 132 кВ и разработанные на их основе рекомендации по повышению статической устойчивости ЭЭС РЙ и качества электроэнергии у потребителей в перспективе до 2020 г.;

3) математические аналитическая и имитационные модели для исследования эффективности дальнего резервирования дистанционными защитами ЛЭП 132 кВ ЭЭС РЙ при КЗ за трансформаторами "звезда-треугольник" с учетом основных влияющих факторов;

4) рекомендации по уточнению методики выбора уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП по условиям требуемой чувствительности к КЗ за трансформатором с соединением обмоток "звезда-треугольник";

5) методика оценки чувствительности микропроцессорных исполнений токовых защит нулевой последовательности кабельных сетей среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, не только при устойчивых ОЗЗ, но и при наиболее опасных для сети ДПОЗЗ.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и конкретных задач исследования; разработке математической имитационной модели электрической сети напряжением 132 кВ ЭЭС РЙ, исследовании ее достоверности; проведении, обработке и анализе результатов вычислительных экспериментов по исследованию установившихся режимов работы сети 132 кВ ЭЭС РЙ и обоснованию на их основе методов повышения статической устойчивости и качества электроэнергии у потребителей ЭЭС РЙ на перспективу до 2020 г.; разработке методики выбора мест размещения компенсирующих устройств в электрической сети с использованием результатов расчетов на имитационной модели; разработке математических аналитической и имитационных моделей для исследования эффективности дальнего резервирования дистанционными защитами ЛЭП двухфазных КЗ за трансформаторами понизительных подстанций с группой соединения обмоток "звезда-треугольник"; разработке рекомендаций по уточнению методики выбора уставок резервных ступеней ДЗ по условиям чувствитель-

ности к КЗ за трансформаторами с соединением обмоток "звезда-треугольник"; разработке математических моделей для исследования динамических режимов функционирования микропроцессорных исполнений ТЗНП от ОЗЗ кабельных сетей с изолированной нейтралью при дуговых перемежающихся замыканиях, проведении исследований на модели; разработке рекомендаций по методике оценки чувствительности ТЗНП как при устойчивых замыканиях, так и при наиболее опасных для сети ДПОЗЗ.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI, XVII и XVIII «Бенардосовские чтения») (Иваново, ИГЭУ, 2011, 2013 и 2015 гг.), на XIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» в Московском энергетическом институте (Москва, 2013 г.), на VI – X Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2011" – "Энергия-2015 (Иваново, ИГЭУ, 2011–2015 гг.).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 12 работах, в т.ч. в 10 статьях, из них 2 – в изданиях по перечню ВАК, а также в тезисах докладов международных научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 112 наименований. Основной текст включает 155 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложено состояние проблемы, сформулированы цель и задачи работы, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дана общая характеристика работы.

В главе 1 дан анализ современного состояния электроэнергетики РЙ, выполненный на основе данных, предоставленных министерством энергетики страны. Рассмотрены особенности режимов работы ЭЭС РЙ и выявлены основные факторы, влияющие на эффективность функционирования электрической сети и надежность электроснабжения потребителей.

К ним относятся:

- 1) крайне неравномерное распределение энергоресурсов, генерирующих мощностей и производительных сил по территории страны.
- 2) неравномерность загрузки электростанций, расположенных в северных и южных энергорайонах, обуславливающая значительные перетоки активной и реактивной мощностей из северного и центрального регионов в южный регион;
- 3) напряженные балансы активной мощности в южном и юго-западном регионах из-за недостатка генерирующих мощностей, что вызывает необходимость в ограничениях потребителей;
- 4) существенное уменьшение (с учетом социально-политической обстановки в стране в последние годы) инвестиций в развитие генерирующих мощностей и магистральных ЛЭП 400 кВ.

Рассмотрены особенности основной системообразующей электрической сети ЭЭС РЙ напряжением 132 кВ (рис. 1).

с изолированной нейтралью, в значительной мере зависит от эффективности функционирования максимальных токовых защит от ОЗЗ.

На основе проведенного анализа особенностей и эффективности работы электрических сетей высокого и среднего напряжения, а также эффективности функционирования их релейной защиты обоснована цель работы и поставлены приведенные выше конкретные задачи исследования.

Глава 2¹⁾ посвящена исследованиям установившихся режимов электрической сети 132 кВ ЭЭС РЙ в целях разработки методов повышения эффективности ее функционирования и на этой основе повышения надежности электроснабжения потребителей и качества поставляемой им электроэнергии. На основе данных, предоставленных Министерством энергетики РЙ, в среде программного комплекса "Энергия" разработана математическая имитационная модель электрической сети 132 кВ, соответствующая схеме на рис. 1. Адекватность разработанной модели и точность полученных на ее основе результатов расчетов установившихся режимов (УР) ЭЭС РЙ оценивались их сравнением с реальными данными измерений значений перетоков мощности по ЛЭП и напряжений в узлах сети 132 кВ на 03.07.2010 г. и 01.08.2012 г. Анализ показал, что расхождение расчетных и действительных значений напряжений в узлах не превышает 5%. Погрешности расчета перетоков активной P и полной S мощности по ЛЭП сети 132 кВ в основном не превышают 5–10%.

Сформулированы основные задачи расчетов УР электрической сети 132 кВ ЭЭС РЙ:

1. Анализ уровней напряжения в узлах нагрузки электрической сети 132 кВ в перспективе до 2025 г. и определение «слабых» узлов с точки зрения обеспечения статической устойчивости ЭЭС РЙ.

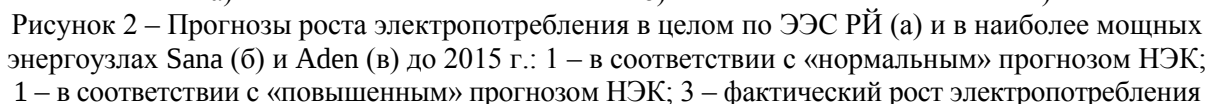
2. Анализ потокораспределения в ЛЭП электрической сети 132 кВ и определения соответствия их пропускной способности ожидаемым перетокам мощности в перспективе до 2025 г.

3. Обоснование мероприятий по повышению статической устойчивости ЭЭС РЙ и качества электроэнергии у потребителей.

Для расчетов УР на основе общего прогноза роста электропотребления, разработанного в начале 2000-х годов национальной энергетической компанией РЙ, рассчитаны приближенные зависимости увеличения нагрузки в основных узлах электрической сети 132 кВ на каждый год в период с 2010 г. по 2025 г. (рис. 2). Расчетные прогнозы роста электропотребления в узлах сети 132 кВ скорректированы с учетом данных по реальным нагрузкам за 2010–2012 гг.

Результаты расчетов УР электрической сети 132 кВ по напряжениям в узлах показали, что при прогнозируемом росте электропотребления в энергорайонах РЙ, начиная с 2014 г., ЭЭС РЙ не сможет обеспечивать ни требуемое качество напряжения у потребителей, ни достаточную степень статической устойчивости. В настоящее время статическая устойчивость поддерживается в основном за счет отключений части нагрузки.

Автор выражает к.т.н., доценту Кулешову А.И. благодарность за консультации по вопросам расчета и анализа установившихся режимов электрических сетей с применением программного комплекса "Энергия"



В качестве основного мероприятия для повышения напряжений в узлах сети 132 кВ до уровней, обеспечивающих необходимый запас статической устойчивости и минимально допустимые требования к качеству напряжения, рассматривалось применение компенсирующих устройств (КУ), генерирующих реактивную мощность. Анализ, выполненный с использованием имитационной модели, показал, что установка КУ только в одном узлов сети 132 кВ (например, Dhamar, Taiz, Hiswa и др.) не позволяет получить приемлемое решение указанной задачи. Поиск оптимального варианта размещения КУ в нескольких узлах сети и выбор величины их мощности с использованием имитационного моделирования требует исследования множества расчетных вариантов и связан с большими затратами времени и труда на обработку и анализ их результатов. Для повышения эффективности моделирования на ЭВМ предложено предварительно получить приближенное решение задачи по уравнениям, связывающим приращения напряжения δU_i в рассматриваемом i -м узле к приращению мощности δQ_j КУ в j -м узле включения последнего:

$$\Delta U_n \approx \Delta Q_1 \left(\frac{\delta U_n}{\delta Q_1} \right)_{cp} + \Delta Q_2 \left(\frac{\delta U_n}{\delta Q_2} \right)_{cp} + \Delta Q_3 \left(\frac{\delta U_n}{\delta Q_3} \right)_{cp} + \dots + \Delta Q_n \left(\frac{\delta U_n}{\delta Q_n} \right)_{cp}.$$

При приближенных расчетах можно принять, что значения коэффициентов $\partial U_i / \partial Q_j$ в исследуемом режиме работы сети примерно равны средним значениям $(\partial U_i / \partial Q_j)_{\text{ср}}$ для расчетных диапазонов изменения мощности КУ Q_j .

Для уточнения полученных из (1) значений ΔQ_j следует использовать имитационное моделирование на ЭВМ.

Анализ значений коэффициентов $\delta U/\delta Q$ позволяет определить узлы установки КУ, обеспечивающие достижение требуемого эффекта при минимуме числа источников реактивной мощности. Оптимальным следует считать такое решение задачи, которое требует применения минимального числа и минимальной суммарной мощности дополнительных КУ, устанавливаемых в сети.

С использованием рассмотренной методики показано, что при прогнозируемом росте электропотребления в узлах нагрузки сети 132 кВ на период до 2020 г. требуется установка КУ до 2017 г. в 3-х узлах (Sana, Dhamar, Hiswa), а с 2018 г. – кроме названных узлов также в узле Taiz. В качестве КУ в сети 132 кВ целесообразно использовать батареи статических конденсаторов с автоматическим регулированием мощности. Рис. 3 иллюстрирует эффективность применения КУ в целях повышения

коэффициента мощности в сети 132 кВ.

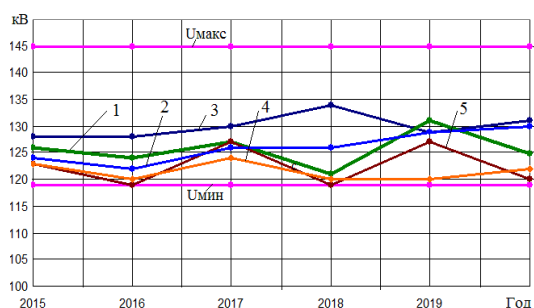


Рисунок 3 – Зависимости напряжения в «слабых» узлах сети 132 кВ (1 – Dhamar; 2 – Taiz; 3 – Hiswa; 4 – I bb; 5 – Sana) при прогнозируемом росте электропотребления и установке КУ расчетной мощности в расчетных узлах

Для повышения уровней напряжения в «слабых» узлах и повышения статической устойчивости на протяженных ЛЭП 132 кВ в принципе могут быть применены также устройства продольной компенсации (УПК) индуктивного сопротивления воздушных ЛЭП. Применение УПК представляется целесообразным прежде всего на наиболее протяженных ЛЭП 132 кВ, обеспечивающих транзит активной и реактивной мощности от ПГЭС Marib в южные энергорайоны Hiswa–Aden. К таким линиям относятся, в частности, ЛЭП Hiziaz–Dhamar протяженностью 102 км и ЛЭП Dhamar–Ibb–Taiz (рис. 1), имеющая суммарную протяженность 132 км. Однако анализ результатов вычислительных экспериментов на имитационной модели показал, что применение УПК на ЛЭП 132 кВ в значительно меньшей степени влияет на напряжения в узлах сети, чем применение КУ.

Глава 3 посвящена анализу причин недостаточной эффективности дальнего резервирования ДЗ при междуфазных КЗ за трансформаторами промежуточных и ответвительных подстанций сети 132 кВ.

Известно, что существенное влияние на замер реле сопротивления (РС) ДЗ – первичное сопротивление на зажимах РС ДЗ и, следовательно, ее чувствительность при несимметричных КЗ за трансформаторами понизительных подстанций оказывает трансформация "звезда-треугольник". Влияние трансформации "звезда-треугольник" на работу РС резервных ступеней ДЗ усиливается при наличии "подпитки" места КЗ на ЛЭП с двусторонним питанием, угла сдвига между ЭДС по концам ЛЭП, неравенстве их значений, переходного сопротивления в месте повреждения. Комплексное влияние указанных факторов на чувствительность резервных ступеней ДЗ в применяемых в настоящее время методиках выбора их уставок по сопротивлению срабатывания не учитывается, что может быть

Рисунок 4 – Расчетная трехфазная схема замещения для определения замера ДЗ при $K_{AC}^{(2)}$ за трансформатором с соединением обмоток Y/Δ-11

$$Z_{AB} = \frac{2\sqrt{3}}{3} e^{j30^\circ} \left[(Z_C + Z_{II} + \frac{Z_T}{K_T}) + \frac{1}{2} \frac{R'_{II}}{K_T} \right] - Z_C = \quad (2)$$

$$Z_{CA} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} e^{j150^\circ} \left[(Z_C + Z_{II} + \frac{Z_T}{K_T}) + \frac{1}{2} \frac{R'_{II}}{K_T} \right] - Z_C = \quad (3)$$

$$Z_{BC} \rightarrow \infty, \quad (4)$$

Полученное решение позволяет проанализировать влияние на замер РС резервных ступеней ДЗ основных и неосновных фаз таких факторов, как трансформация «звезда-треугольник», подпитка места КЗ и переходное сопротивление в месте повреждения при отсутствии угла сдвига между ЭДС питающих систем $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$, т.е. при $\delta = \arg(\dot{E}_1 / \dot{E}_2) = 0$ (например, рис. 5).

$$X_{c.3}^{(pe3.)} \geq K_{c.min}^{(pe3)} (X_{\mathcal{I}} + \frac{X_T}{K_T} + \frac{\sqrt{3}}{3} (R_C + R_{\mathcal{I}} + \frac{R_T}{K_T} + \frac{1}{2} \frac{R'_{\mathcal{I}}}{K_T})), \quad (5)$$
$$\Delta X_{c,3}^{(pe3)} = K_{\psi, \min}^{(pe3)} \frac{\sqrt{3}}{3} (R_C + R_L + \frac{R_T}{K_T} + \frac{1}{2} \frac{R_{II}'}{K_T}) \approx 0,577 K_{\psi, \min}^{(pe3)} (R_C + R_L + \frac{R_T}{K_T} + \frac{1}{2} \frac{R_{II}'}{K_T}). \quad (6)$$

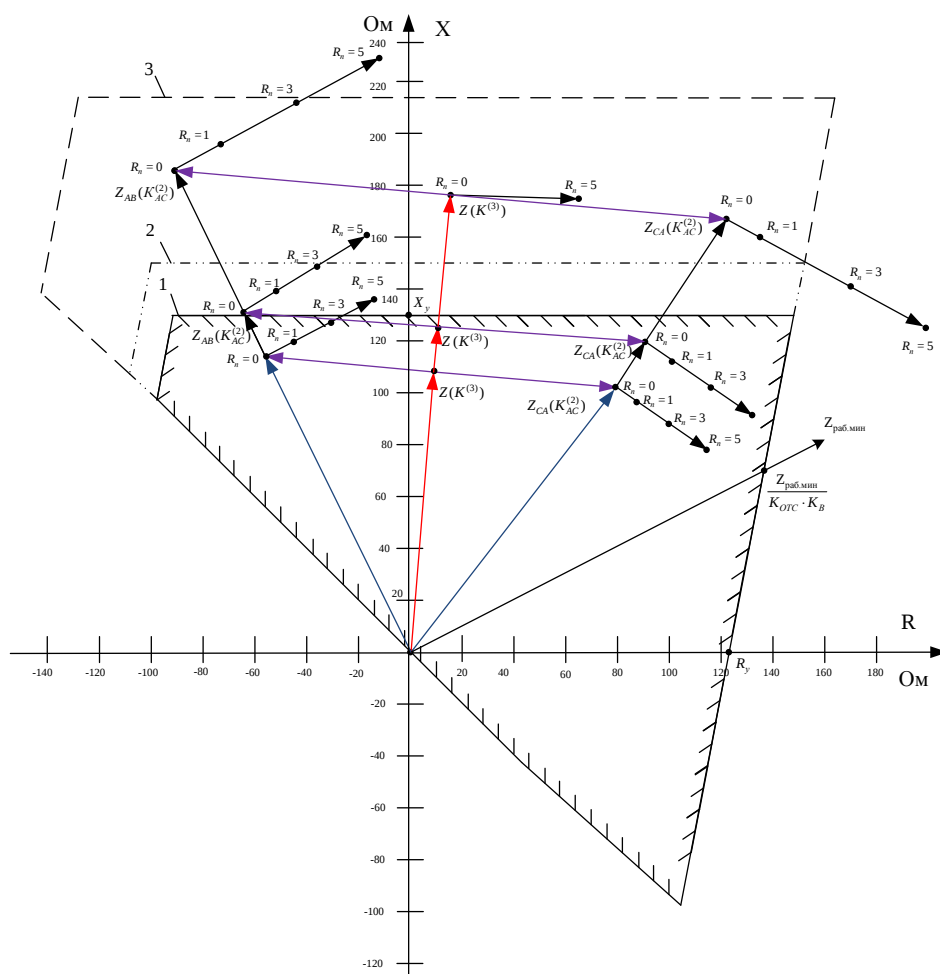


Рисунок 5 – Влияние трансформации «звезда-треугольник» на замер РС, включенных на «петли» КЗ АВ и СА, при двухфазном КЗ $K_{AC}^{(2)}$ за трансформатором $Y/\Delta-11$ при $\delta = 0$ и различных значениях K_T : 1 – $K_T = 1$; 2 – $K_T = 0,8$; 3 – $K_T = 0,5$

Учитывая сложность получения и громоздкость общего аналитического решения для замеров РС ДЗ при $\delta \neq 0$ или $E_{C1} \neq E_{C2}$, комплексное влияние трансформации «звезда-треугольник» в сочетании с указанными факторами исследовалось на математических имитационных моделях, выполненных в среде Matlab. На рис. 6 в качестве примера показаны годографы вектора первичного сопротивления на зажимах РС основных и неосновных фаз при изменении угла δ для различных значений K_T и переходного сопротивления в месте КЗ при $K_{AC}^{(2)}$ за трансформатором $Y/\Delta-11$. Из рис. 6 можно видеть, что в достаточно большом диапазоне значений угла δ замер РС неосновных фаз (включенного на «петлю» КЗ фаз АВ) значительно меньше, чем замер РС основных фаз (включенного на «петлю» КЗ фаз СА), и, увеличивая уставку по реактивной составляющей $X_{c.3}$, можно обеспечить повышение чувствительности ДЗ к КЗ за трансформатором со схемой соединения обмоток Y/Δ за счет срабатываний РС неосновных фаз.

По результатам расчетов на имитационной модели определены наиболее тяжелые расчетные условия для выбора уставки по реактивной составляющей из условия обеспечения чувствительности при двухфазном КЗ за трансформатором Y/Δ (рис. 7).

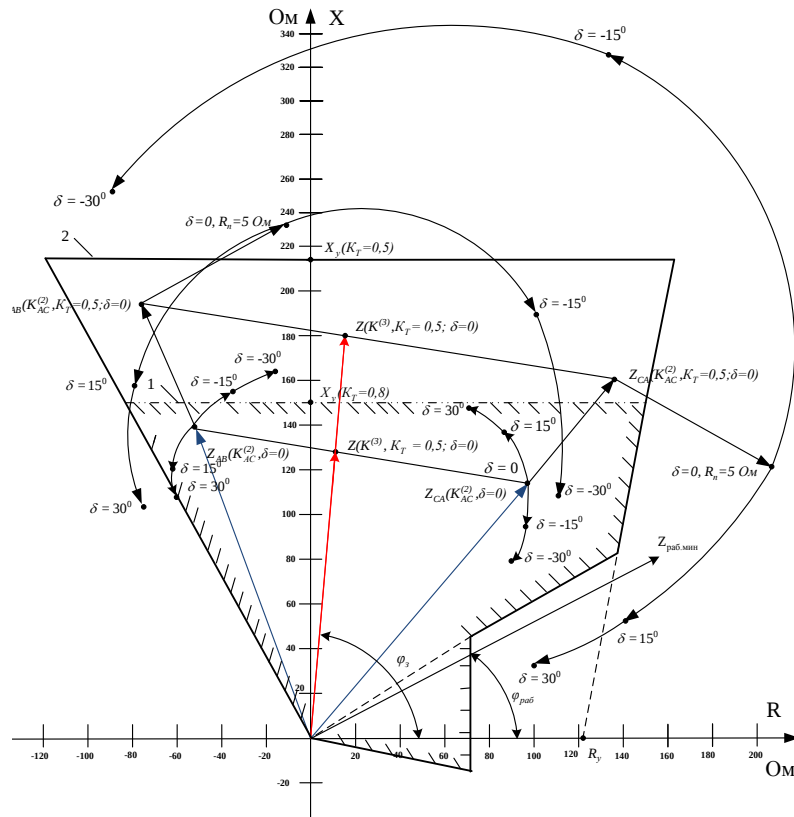


Рисунок 6 – Влияние угла δ сдвига фаз между ЭДС по концам ЛЭП на замер резервной ступени ДЗ, выполненной с применением РС с зоной блокировки в нагрузочных режимах (1 и 2 – характеристики срабатывания РС при значениях $K_T = 0,5$ и $0,8$), при $K_{AC}^{(2)}$ за трансформатором $Y/\Delta-11$ при $R_n = 0$ и $R_n = 5$ Ом, $E_1/E_2 = 1$

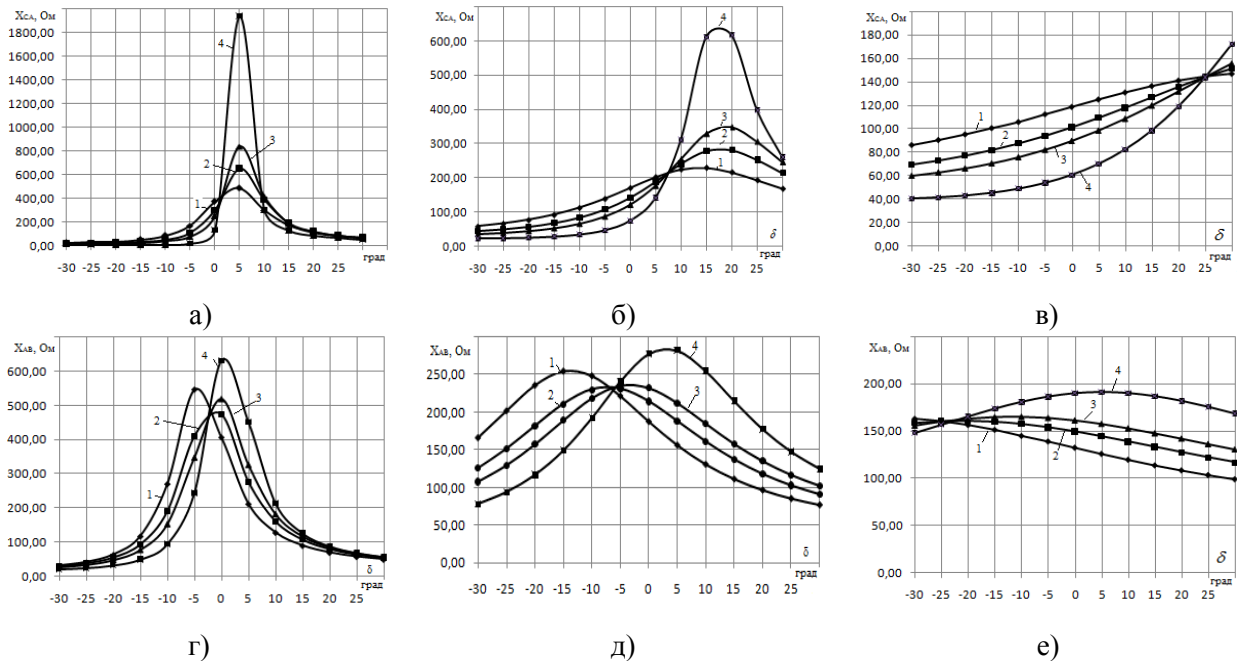


Рисунок 7 – Зависимости реактивной составляющей X_{CA} замера РС, включенного на «петлю КЗ» фаз СА (РС основных фаз), и реактивной составляющей X_{AB} замера РС, включенного на «петлю КЗ» фаз АВ (РС неосновных фаз) от угла $\delta = \arg(\dot{E}_1 / \dot{E}_2)$ при $K_{AC}^{(2)}$ за трансформатором $Y/\Delta-11$: а, г – $K_T = 0,2$; б, д – $K_T = 0,5$; в, е – $K_T = 0,8$;
1 – $R_{II} = 0$ Ом; 2 – $R_{II} = 3$ Ом; 3 – $R_{II} = 5$ Ом; 4 – $R_{II} = 10$ Ом

Анализ результатов расчетов на имитационной модели показал, что в наиболее тяжелых с точки зрения чувствительности расчетных условиях – при наименьших значениях коэффициента токораспределения K_T замер РС неосновных фаз по реактивной составляющей достигает наибольших значений при углах δ , близких к нулю. Это означает, что в наиболее тяжелых расчетных условиях (при малых значениях $K_T < 0,2 \dots 0,3$) необходимое для устойчивых срабатываний РС неосновных фаз повышение чувствительности резервных ступеней ДЗ к КЗ за трансформаторами Y/Δ понизительных подстанций можно обеспечить за счет увеличения уставки по реактивной составляющей сопротивления срабатывания в соответствии с выражениями (5) и (6). При значениях $K_T > 0,3$ для уточнения уставок РС может быть использовано имитационное моделирование на ЭВМ.

Для проверки предложенного способа повышения эффективности дальнего резервирования при КЗ за трансформаторами понизительных подстанций в среде системы моделирования Simulink разработана имитационная модель участка сети 132 кВ ЭЭС РЙ, включающего несколько ЛЭП различной протяженности: Ras Katenib – Bajil, Bajil – Dhamar и Bajil – Jarahi, Jarahi – Mukha (рис. 1). Анализ, выполненный с использованием имитационной модели, подтвердил возможность повышения чувствительности резервных ступеней ДЗ указанных ЛЭП при КЗ за трансформаторами понизительных подстанций при выборе их уставок в соответствии с рассмотренной выше методикой.

В главе 4²⁾ приведены результаты исследований способов обеспечения динамической устойчивости функционирования микропроцессорных токовых защит от ОЗЗ в распределительных кабельных сетях напряжением 11 кВ, работающих с изолированной нейтралью. Возможность применения ТЗНП на конкретном присоединении защищаемого объекта определяется условием обеспечения селективности несрабатываний при внешних ДПОЗЗ и чувствительности при внутренних ОЗЗ, которое может быть записано в следующем виде:

$$I_{C\text{собс}^*} = \frac{I_{C\text{собс}}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + K_{\text{отс}} K_{\text{бр.макс}} K_{\text{ч.мин}}}, \quad (7)$$

где $I_{C\text{собс}}$ – собственный емкостный ток защищаемого присоединения; $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки; $K_{\text{бр.макс}}$ – максимальное значение коэффициента, учитывающего увеличение значения воздействующей величины измерительного органа тока ТЗНП при ДПОЗЗ (называемый часто коэффициентом броска емкостного тока при ОЗЗ); $K_{\text{ч.мин}}$ – минимально допустимое значение коэффициента чувствительности.

Чувствительность ТЗНП в соответствии с существующими требованиями принято оценивать только при устойчивых ОЗЗ:

$$K_{\text{ч.уст}} = \frac{I_{C\Sigma\text{ мин}} - I_{C\text{собс}}}{I_{0\text{с.з}}} = \frac{I_{C\Sigma\text{ мин}} - I_{C\text{собс}}}{K_{\text{отс}} K_{\text{бр.макс}} I_{C\text{собс}}} \geq K_{\text{ч.мин}}. \quad (8)$$

Способ оценки эффективности срабатываний ТЗНП при внутренних повреждениях по (8) и оценки условий применимости по (7) не гарантирует устойчивых срабатываний защиты при наиболее опасных для сети и поврежденного элемента ДПОЗЗ. Следует отметить также, что в известных источниках, посвященных расчетам уставок срабатывания микропроцессорных исполнений ТЗНП конкретные рекомендации по выбору значений $K_{\text{бр.макс}}$ отсутствуют.

Автор выражает благодарность к.т.н., доценту Добрягиной О.А. за консультации по вопросам имитационного моделирования динамических режимов функционирования токовых защит от ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения

Таким образом, для повышения эффективности функционирования цифровых исполнений ТЗНП в кабельных сетях, работающих с изолированной нейтралью, должны быть решены 2 задачи:

1) обоснование значений $K_{бр. макс}$, гарантирующих устойчивые несрабатывания ТЗНП при внешних ДПОЗЗ;

2) обоснование способа оценки чувствительности ТЗНП не только при внутренних устойчивых, но и более опасных для сети ДПОЗЗ.

Для решения 2-й из указанных задач предложено использовать способ, аналогичный используемому в условии отстройки ТЗНП от внешних ДПОЗЗ, основанный на определении минимального соотношения между значением воздействующей величины при опасных внутренних ДПОЗЗ и устойчивых ОЗЗ. По аналогии с $K_{бр. макс}$ этот коэффициент может быть назван $K_{бр. мин}$. Используя введенное понятие $K_{бр. мин}$, можно оценить чувствительность ТЗНП при ДПОЗЗ по выражению:

$$K_{ч. перем} = \frac{K_{бр. мин} (I_{C\Sigma мин} - I_{C собс})}{I_{0с.з}} \geq K_{ч. мин}, \quad (9)$$

а условие применимости ТЗНП представить в следующей форме:

$$I_{C собс*} = \frac{I_{C собс}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{K_{бр. мин}}{K_{бр. мин} + K_{отс} K_{бр. макс} K_{ч. мин}}. \quad (10)$$

Из соотношений (9) и (10) можно видеть, что для практического применения предложенного подхода к оценке чувствительности и условий применимости ТЗНП должны быть определены значения $K_{бр. макс}$ и $K_{бр. мин}$. Аналитическое определение значений указанных коэффициентов, учитывая сложность уравнений, описывающих переходные процессы при ДПОЗЗ в кабельных сетях среднего напряжения, невозможно. Поэтому в качестве метода исследования использовалось математическое моделирование с использованием имитационных моделей кабельных сетей.

При моделировании измерительных органов цифровых исполнений ТЗНП учитывалось, что в них в качестве воздействующей величины используется среднеквадратичное значение составляющей промышленной частоты I_{50} тока $3I_0$.

Для определения максимальных среднеквадратичных значений составляющей i_{50} тока переходного тока $3i_0$ и соответствующих им максимальных значений коэффициента $K_{бр. макс}$ имитировались ДПОЗЗ на шинах центра питания по теории W. Petersen (с гашениями заземляющей дуги при первом переходе через нулевое значение зарядной составляющей переходного тока ОЗЗ и повторными зажиганиями дуги через 10 миллисекунд на максимуме восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе). Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты оценки значений $K_{бр. макс}$ при ДПОЗЗ по теории W. Petersen в кабельных сетях 11 кВ с различными значениями $I_{C\Sigma}$

$I_{C\Sigma}, \text{ А}$	5	10	15	20
$I_{C собс} = 0,25 I_{C\Sigma}, \text{ А}$	1,25	2,5	3,75	5
$I_{50 неп}, \text{ А}$	4,1	6,2	10,7	14,0
$K_{бр. макс} = I_{50 неп} / I_{C собс}, \text{ о.е.}$	3,3	2,5	2,8	2,8

Из данных табл. 1 можно видеть, что по оценкам, полученным на моделях, для микропроцессорных исполнений ТЗНП, реагирующих на среднеквадратичное значение составляющей промышленной частоты тока $3i_0$, $K_{бр. макс} \approx 2,8...3,3$. Известно (например, Сиротинский Л.И., Лихачев Ф.А. и др.), что оценки на моделях, дают, как правило, завышенные на 10 и более процентов значения максималь-

ных амплитуд бросков переходных токов при ОЗЗ. С учетом этого при расчетах уставок по току срабатывания цифровых ТЗНП для кабельных сетей среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, с некоторым запасом можно принять $K_{бр.макс} \approx 0,9K_{бр.макс.расч} = 0,9 \cdot 3,3 \approx 3$, что больше, чем рекомендуемые существующими методиками расчета уставок цифровых ТЗНП значения $K_{бр.макс} = 2,0 - 2,5$.

При увеличении интервалов времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги амплитуды свободных составляющих переходных токов при повторных зажиганиях заземляющей дуги уменьшаются, поэтому среднеквадратичное значение тока ДПОЗЗ также уменьшается. С увеличением величины Δt уменьшаются также и максимальные перенапряжения, сопровождающие дуговые прерывистые ОЗЗ. На рис. 8 приведена зависимость кратности перенапряжений $K_{II} = U_{II.макс}/U_{ф.т} = U_{II.макс}/\sqrt{2}U_{ном}/\sqrt{3}$ на неповрежденных фазах в зависимости от интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции, полученная с использованием разработанных имитационных моделей кабельных сетей с $U_{ном}$ до 11 кВ с изолированной нейтралью с различными значениями суммарного емкостного тока $I_{CS} = 5 \dots 20$ А.

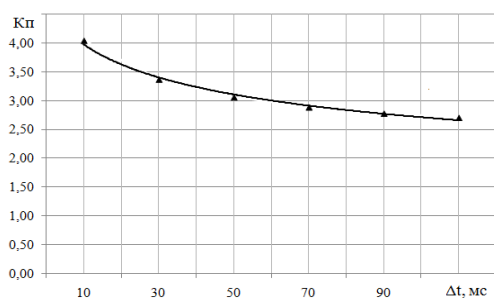


Рисунок 8 – Зависимость кратности максимальных перенапряжений при дуговых ОЗЗ в кабельных сетях среднего напряжения (до 11 кВ) с изолированной нейтралью с $I_{CS} = 5 \dots 20$ А от интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции

Известно, что применяемые для защиты кабельных сетей от дуговых перенапряжений ограничители перенапряжений с учетом их технических возможностей и методики выбора их параметров обеспечивают величину остающегося напряжения $U_{ост} \approx (2,7 \dots 3)U_{ф.т}$. С учетом этого перенапряжения, характеризующиеся кратностью $K_{II} \leq 3$ можно рассматривать как относительно безопасные для контролируемой сети. Отметим также, что наиболее слабыми по запасам изоляционной прочности элементами кабельных сетей напряжением до 11 кВ являются электрические машины (электродвигатели и генераторы), изоляция которых при высоковольтных испытаниях в соответствии с существующими нормами должна проверяться напряжением $U_{исп} \approx 2,9U_{ф.т}$. Поэтому для электрических машин дуговые перенапряжения, превышающие указанный уровень, должны рассматриваться как опасные. Из рис. 8 можно видеть, что максимальные расчетные кратности перенапряжений K_n при дуговых прерывистых ОЗЗ уменьшаются до указанных относительно безопасных для сети уровней при интервалах между повторными пробоями изоляции $\Delta t \approx 60 \dots 70$ мс (рис. 8). Поэтому такие дуговые ОЗЗ следует рассматривать как опасные ДПОЗЗ, при которых ТЗНП должна срабатывать. Отметим, что полученные расчетные оценки $\Delta t_{макс} \leq \sim 60-70$ мс достаточно хорошо коррелируются с экспериментальными данными, полученным в реальных кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью, в соответствии с которыми при ДПОЗЗ интервалы времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги обычно не превышают значений 40–50 мс.

Так как значения коэффициента $K_{бр}$ также зависят в основном от интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции при дуговых ОЗЗ, можно построить зависимость $K_{бр} = f(\Delta t)$ для кабельных сетей среднего напряжения и на ее основе определить область значений $K_{бр}$, соответствующих области опасных для сети перенапряжений. На рис. 9 приведена построенная по данным расчетов на имитационных моделях кабельных сетей напряжением до 11 кВ с $I_{СЗ} = 5 \dots 20$ А зависимость средних значений коэффициента $K_{бр} = f(\Delta t)$.

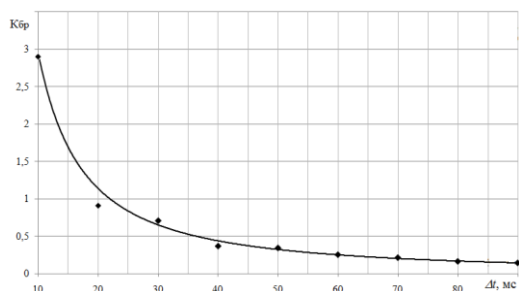


Рисунок 9 – Зависимость значений $K_{бр}$ от интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции при дуговых прерывистых ОЗЗ в кабельных сетях напряжением до 11 кВ

Полученная зависимость $K_{бр} = f(\Delta t)$ позволяет определить минимальные значения $K_{бр.мин}$, при которых ТЗНП должна обеспечивать требуемую чувствительность для фиксации не только устойчивых, но и дуговых перемежающихся ОЗЗ, сопровождающихся опасными для сети перенапряжениями. Принимая, что опасные для сети перенапряжения могут возникать при значениях $\Delta t_{мин} = 60\text{--}70$ мс, из зависимости рис. 9 можно получить $K_{бр.мин} \approx 0,2\text{--}0,3$.

Полученные значения $K_{бр.макс}$ и $K_{бр.мин}$ позволяют более точно оценить реальную эффективность функционирования и область возможного применения цифровых исполнений ТЗНП на объектах распределительных кабельных сетей среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, по вычислениям (9) и (10).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 В работе решен комплекс задач, направленных на повышение эффективности функционирования электрических сетей и релейной защиты ЭЭС Республики Йемен.

2 Разработана математическая имитационная модель для расчета установившихся режимов работы системообразующей электрической сети напряжением 132 кВ, достоверность и точность расчетов по которой подтверждена сопоставлением результатов расчетов на модели с параметрами реальных режимов ЭЭС Республики Йемен за 2010-2012 гг.

3 С применением модели по п. 2 выполнены расчеты и анализ установившихся режимов электрической сети 132 кВ, позволяющие обосновать мероприятия по повышению статической устойчивости ЭЭС Республики Йемен и качества электроэнергии у потребителей в ближайшей и среднесрочной перспективе.

4 Разработана методика выбора мест размещения и мощности компенсирующих устройств, основанная на использовании приближенного решения задачи по уравнениям, связывающим приращения напряжения в рассматриваемом узле к изменению мощности компенсирующего устройства в узле включения последнего и последующем уточнении решения с использованием имитационной модели сети по п. 2.

5 Разработаны математическая аналитическая и имитационные модели для исследования эффективности функционирования дальнего резервирования дистанционными защитами ЛЭП 132 кВ ЭЭС РЙ при коротких замыканиях за трансформаторами понизительных подстанций с группой соединения обмоток «звезда-треугольник» с учетом всех основных влияющих факторов.

6 Разработаны рекомендации по уточнению методики выбора уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП по условиям требуемой чувствительности к коротким замыканиям за трансформатором с соединением обмоток «звезда-треугольник», основанные на приближенном аналитическом решении задачи и возможности его уточнения с использованием имитационной модели.

7 Предложен способ и разработана методика оценки чувствительности цифровых исполнений токовых защит нулевой последовательности от однофазных замыканий на землю не только при устойчивых, но и при наиболее опасных для контролируемой сети дуговых перемежающихся замыканиях, основанная на использовании расчетных значений коэффициентов, рассчитанных на имитационных моделях кабельных сетей с изолированной нейтралью.

8 Результаты диссертационных исследований планирует использовать национальная энергетическая компания (Office National de L'Electric ale) Республики Йемен.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Аль-Хомиди, М.С. Исследование адекватности математической модели электроэнергетической системы Республики Йемен // М.С. Аль-Хомиди, А.И. Кулешов, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. Вып. 6. – 2014. – С. 39–43.

2. Винокурова, Т.Ю. Выбор воздействующей величины токовых защит от однофазных замыканий на землю в кабельных сетях среднего напряжения / Т.Ю. Винокурова, М.С. Аль-Хомиди, О.А. Добрягина, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. Вып. 2. – 2015. – С. 21–29.

Публикации в других изданиях

3. Аль-Хомиди, М.С. Исследование режимов работы электроэнергетической системы Республики Йемен / М.С. Аль-Хомиди, В.А. Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов ФГБОУВПО. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. Т. 3. – 2011. – С. 101–108.

4. Аль-Хомиди, М.С. Математическая модель для исследования режимной надежности электроэнергетической системы Республики Йемен / М.С. Аль-Хомиди, В.А. Шуин, А.И. Кулешов // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVII Бенардосовские чтения»). Т. 1. – Иваново: ПресСТО. – 2011. – С. 161–163.

5. Аль-Хомиди, М.С. Анализ пропускной способности ЛЭП сети 132 кВ ЭЭС Республики Йемен по условиям устойчивости / М.С. Аль-Хомиди, В.А. Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов ФГБОУВПО. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. Т. 3. – 2013. – С. 117–124.

6. Аль-Хомиди, М.С. Анализ режимов работы электроэнергетической системы Республики Йемен / М.С. Аль-Хомиди // Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVII Бенардосовские чтения»). Т. 1. – Иваново: ПресСТО. – 2013. – С. 190–193.

7. Аль-Хомиди, М.С. Анализ пропускной способности ЛЭП сети 132кВ ЭЭС Республики Йемен по условиям устойчивости / М.С. Аль-Хомиди, В.А. Шуин //

Вестник российского национального комитета СИГРЭ. Энергия–2013, международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 23–25 апреля 2013 г.: материалы конференции. Т. 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет. – 2013. – № 1. – С. 317–324.

8. **Аль-Хомиди, М.С.** Моделирование дистанционных защит линий сети 132 кВ ЭЭС Республики Йемен для анализа эффективности дальнего резервирования / М.С. Аль-Хомиди, Е.А. Воробьева, В.А. Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: материалы конференции. Т.3. Ч. 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2014. – С. 238–246.

9. **Аль-Хомиди, М.С.** Моделирование дистанционных защит линий сети 132кВ ЭЭС Республики Йемен для анализа эффективности дальнего резервирования / М.С. Аль-Хомиди, В.А. Шуин, Е.А. Воробьева // Вестник российского национального комитета СИГРЭ. Энергия-2014, 9-я международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 15-17 апреля 2014 г.: материалы конференции. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет. Т.1. – 2014. – № 4. – С. 314–323.

10. **Аль-Хомиди, М.С.** Исследование влияния трансформации «звезда-треугольник» на эффективность дальнего резервирования дистанционных защит линий / М.С. Аль-Хомиди, В.А. Шуин // Десятая международная молодежная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015»: Тез. докладов конференции. В 7 т. Т.3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2015. – С. 115–117.

11. **Аль-Хомиди, М.С.** Особенности оценки чувствительности резервных ступеней дистанционных защит при двухфазных коротких замыканиях за трансформатором У/Δ-11 / М.С. Аль-Хомиди, В.А. Шуин // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVIII Бенардосовские чтения»). Т. 3. – Иваново: – 2015. – С. 479–483.

12. **Аль-Хомиди, М.С.** Моделирование установившихся режимов работы энергосистемы Республики Йемен / М.С. Аль-Хомиди, В.А. Шуин // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Девятнадцатая Междунар. научн.-техн. конфер. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. Т. 4. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2013. – С. 239.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве: [1–5, 7–12] – участие в разработке имитационных моделей, проведении вычислительных экспериментов на полученных моделях, анализе и оценке полученных результатов, получении аналитических решений отдельных задач исследования, подготовке иллюстраций результатов.

АЛЬ-ХОМИДИ Марван Саид Саиф

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ ЙЕМЕН

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать .2016 г. Формат 60×80 1/16.

Печать плоская. Усл.печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № .

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ