

На правах рукописи



АБДУЛЛИН ЛИНАР ИЛЬФАТОВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6–35 КВ ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО
РЕЖИМА НА СТОРОНЕ ВЫСШЕГО И НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ
ПОНИЖАЮЩИХ ПОДСТАНЦИЙ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Казань – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ») на кафедре «Электроэнергетические системы и сети».

Научный руководитель: **Федотов Александр Иванович**
доктор технических наук,
профессор, ведущий научный сотрудник
Инжинирингового центра Федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Казанский
государственный энергетический университет»

Официальные оппоненты: **Макаров Валерий Геннадьевич**
доктор технических наук,
доцент, заведующий кафедрой «Электропривод
и электротехника» Федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Казанский
национальный исследовательский
технологический университет»

Геркусов Алексей Анатольевич
кандидат технических
наук, преподаватель отделения среднего
профессионального образования Федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Казанский
национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Ведущая организация: Государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Альметьевский государственный нефтяной
институт» (г. Альметьевск)

Защита состоится «19» декабря 2017 г. в 13.00 в аудитории 1315 на заседании диссертационного совета Д 212.165.02 при ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» по адресу: 603950, ГСП-41, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим присылать по адресу: г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте <http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>

Автореферат разослан «_____» _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.165.02  Титов Д.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Распределительные электрические сети напряжением 6-10-35 кВ являются одними из наиболее протяженных в большинстве как региональных, так и федеральных сетевых компаний. Электрические сети рассматриваемого класса напряжений выступают в подавляющем большинстве случаев в качестве единственного источника питания для мелкомоторных и бытовых потребителей электроэнергии в сельской местности, что является одной из основополагающих причин необходимости повышения надежности их функционирования.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются основным видом электрических повреждений в распределительных электрических сетях, и по разным оценкам именно они вызывают порядка 70% от общего числа всех повреждений на данном уровне напряжений.

Проблема выявления как самого факта ОЗЗ, так и места его появления не теряет своей актуальности для распределительных сетей, она изучалась на протяжении нескольких десятков лет многими выдающимися отечественными и зарубежными учеными и специалистами электротехниками. Среди исследований, проведенных за последние десятилетия, необходимо выделить работы А.И. Шалина, В.А. Шуина, Н. Lee Willis, Y.G. Paithankar, Paul Gill, J. Lewis Blackburn и др. Существенный вклад в исследование данной проблемы внесли ученые, проводившие исследования в рамках функционирования Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения – CIGRE и Института инженеров по электротехнике и электронике – IEEE.

Однако, несмотря на вышеупомянутые исследования, существующие методики выявления ОЗЗ, применяемые в данное время в большинстве распределительных сетей, практически не учитывают изменения технических условий функционирования сетей. Они ориентированы на имеющиеся средства релейной защиты, тогда как вновь вводимые цифровые подстанции предоставляют возможности динамического мониторинга параметров качества электроэнергии. Так, в новой концепции Smart Grid релейная защита (РЗ) должна быть совмещена с функциями информационно-измерительной системы. Причиной этого является то, что, во-первых, микропроцессорные устройства

релейной защиты производят измерения токов, напряжений в векторной форме. Во-вторых, они записывают и накапливают информацию об аварийных режимах и собственных срабатываниях. Эта информация может быть напрямую использована в будущих контрольно-информационно-измерительных системах Smart Grid».

Таким образом, имеется противоречие, заключающееся в том, что, несмотря на актуальность и практическую значимость рассматриваемого вопроса, отсутствуют системы текущего мониторинга и распознавания мест ОЗЗ, учитывающие влияние сложной топологии распределительной сети и других факторов, осложняющих обнаружение мест повреждения.

Цель диссертационной работы: повышение надежности и качества электроснабжения потребителей путем оперативного распознавания фидеров с ОЗЗ и мест повреждения на них в распределительных электрических сетях древовидной структуры.

Объектом исследования являются распределительные сети с изолированной нейтралью классом напряжений 6-10-35 кВ.

Предметом исследования являются закономерности изменения «резонансных» частот в зависимости от места ОЗЗ в распределительных сетях древовидной структуры и принципы функционирования систем распознавания мест ОЗЗ.

Научная задача исследования заключается в научно обоснованной разработке систем мониторинга ОЗЗ с функциями определения расстояния до места повреждения. Решение поставленной задачи проводится по следующим основным направлениям:

- анализ средств и методов обнаружения ОЗЗ, направлений развития систем их мониторинга, разработка соответствующих методик выделения и использования информативных признаков наличия ОЗЗ в привязке к месту его появления;
- проведение имитационного моделирования и экспериментальных исследований по распознаванию информативных признаков ОЗЗ в различных точках электрической сети на различных ступенях номинального напряжения;

- разработка сенсоров для выделения информативных признаков ОЗЗ в параметрах режима электрической сети, и разработка на их основе систем распознавания мест ОЗЗ в электрических сетях древовидной структуры.

Научная новизна исследования:

1. Показана взаимосвязь между проявляющимися высшими «резонансными» гармониками и местоположением ОЗЗ в районных электрических сетях с учетом влияния прилегающей электрической сети.

2. Разработана система идентификации участка с ОЗЗ в районных электрических сетях на основе выделения диагностических признаков местоположения источника высших гармоник при использовании математического аппарата «нечеткая логика».

3. Выполненные натурные эксперименты режимов ОЗЗ в действующих распределительных электрических сетях напряжением 10 кВ показали, что гипотеза о наличии «резонансных» частот в спектре напряжений, обусловленных волновыми свойствами электропередачи в режиме дугового ОЗЗ, подтвердилась. Подтверждено положение о проявлении «резонансных» гармоник на стороне 0,4 кВ понижающих подстанций. Экспериментально обоснована возможность мониторинга режима ОЗЗ на фидерах 6–35 кВ по уровню высших «резонансных» гармоник на любой из фаз каждого фидера.

Теоретическая значимость работы заключается в создании и обосновании математической модели РЭС и выделении диагностических значений параметров напряжения в режимах ОЗЗ. Работа выполнялась в соответствии с НИР «Методы повышения надежности электроснабжения и качества электроэнергии в распределительных электрических сетях» (задание №2014/448 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России).

Практическая значимость работы заключается в том, что на основе сенсоров для диагностики ОЗЗ, устанавливаемых в распределительных сетях, может быть внедрена система определения участков электропередач с ОЗЗ. Тем самым существенно уменьшаются как временные, так и ресурсные затраты при работе обслуживающего персонала с одновременным улучшением качественных показателей распределительных сетей. Использование представленных в диссертационной работе материалов предполагается при разработке системы идентификации фидеров с ОЗЗ в РЭС «Высокогорские

электрические сети» филиала «Приволжские электрические сети» ОАО «Сетевая компания», г. Казань.

Достоверность результатов, выводов и рекомендаций обеспечивалась применением при решении поставленных задач корректных математических моделей, использованием апробированных программных продуктов для имитационного моделирования режимов исследуемых электрических сетей, физической обоснованностью применяемых допущений, экспериментальным подтверждением выдвинутых теоретических положений.

Апробация работы. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах: VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (г. Иваново, 2013 г.), VIII Открытой молодежной науч.-практ. конф. «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (г. Казань, 2014 г.); IX Междунар. молодежной науч.-техн. конф. «Гинчуринские чтения» (г. Казань, 2014 г.); XI Всерос. науч.-техн. конф. «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем материалы» (г. Чебоксары, 2015 г.); VII Междунар. молодежной науч.-техн. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Казань, 2016 г.); Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в РТ «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (г. Альметьевск, 2016 г.), а также на аспирантско-магистерских семинарах КГЭУ.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 14 научных публикациях, из них 3 публикации в журналах, входящих в перечень ВАК.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы». Результаты, представленные в диссертационной работе, соответствуют следующим пунктам паспорта специальности:

- П.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

- П.4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Методы и методики исследования: изучение научной литературы по исследуемой проблеме, ее теоретический анализ. Математическое моделирование процессов изменения показателей качества электроэнергии. Экспериментальное измерение показателей качества электроэнергии при ОЗЗ в распределительной сети. Сравнительные методы. При математическом моделировании и обработке результатов использовался программный продукт Матлаб и его приложение Симулинк. Для разработки технических решений использовались программные продукты ЛТСПайс IV, ИГЛ 7.1.0, а также Код Компоузер Студио 3.3.

Конкретное личное участие автора в получении результатов: все теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, получены лично автором диссертации. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит формализация задач, разработка теоретических и методических положений, компьютерных моделей и анализ результатов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методика расчета зависимости резонансных частот с учетом влияния прилегающей электрической сети от места возникновения замыкания в линии электропередачи для выделения диагностического признака обнаружения и локализации места повреждения.

2. Имитационные модели электрической сети с результатами оценки уровня информативных сигналов ОЗЗ и идентификации места повреждения на основе использования значений «резонансных» гармоник, выделяемых математическим аппаратом «нечеткая логика», и значений фазного напряжения на стороне высшего и низшего напряжений понижающих подстанций.

3. Система распознавания ОЗЗ и места повреждения на основе разработанных сенсоров и результаты натурных экспериментов по выявлению информативных признаков ОЗЗ на разных ступенях номинального напряжения распределительной электрической сети.

Структура работы: диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации 186 страниц. Работа иллюстрирована таблицами, рисунками. Список литературы включает 116 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, определяется степень ее разработанности на современном этапе развития электроэнергетики; выделяются объект, предмет, цель, гипотеза, задачи и методы исследования; характеризуется научная новизна исследования, теоретическая и практическая значимость.

Первая глава посвящена анализу сложившихся в науке концептуальных идей в области защиты от ОЗЗ, а также формулировке положений, образующих теоретическую базу исследований.

Представлена к рассмотрению проблема диагностирования ОЗЗ в общем плане. Анализ работ зарубежных и отечественных исследователей показал, что одним из ключевых вопросов диагностирования ОЗЗ является выделение признака диагностирования.

Одновременно в исследованиях выделена необходимость улучшения релейной защиты, в том числе и защиты от ОЗЗ, за счет внедрения микропроцессорных устройств, которые обеспечивают значительные преимущества для повышения безопасности, контроля, защиты и управления электрическими сетями. Дан анализ основных принципов построения существующих защит от ОЗЗ. Показано, что методы диагностики ОЗЗ, применяемые на практике, раскрывают существенные ограничения по их применению. Дополнительно раскрыты особенности математического аппарата «нечеткая логика» применительно к решаемым задачам по диагностике ОЗЗ.

Анализ научных публикаций и материалы патентного исследования выявил следующие направления развития в области современных систем релейной защиты:

- переход систем защиты от аналогового к цифровому типу;
- использование математических алгоритмов функционирования цифровых таких, как нечеткая логика, вейвлет-преобразование и т.д., позволяющих работать с существенными объемами входной информации;
- внедрение web-инструментов для реализации сетевых возможностей в области релейной защиты позволяет работать с существенно большим объемом

информации, что положительным образом сказывается на диагностических свойствах релейной защиты;

- существующая неточность входной информации об амплитуде и частоте высших гармоник (ВГ) может привести к неоправданно высокому значению погрешности при нахождении решения на основе классической логики. Нечёткие контроллеры лишены данного недостатка по причине их гибкости к качеству информации на входе;

- нечеткие контроллеры имеют более высокое быстродействие вследствие меньшего объема входной информации, что является критичным для цифровых сигнальных процессоров (ЦСП), поскольку позволяет более компактно генерироваться в исполнительный код;

- существенное уменьшение математического описания реальных установившихся и переходных процессов в электроэнергетической системе;

- снижение трудоемкости программирования нечеткого котроллера.

Вторая глава посвящена определению закономерностей изменения «резонансных» частот электропередачи РЭС в условиях однофазной поперечной несимметрии. Для проведения теоретического исследования по оценке эффекта наличия дополнительных линий использовалась принципиальная схема электрической сети, изображенная на рис. 1, где ЦП – центр питания. На рис. 2 представлены частотные характеристики электропередачи. На рис. 3 и 4 приведены исходная и результирующая схемы замещения.

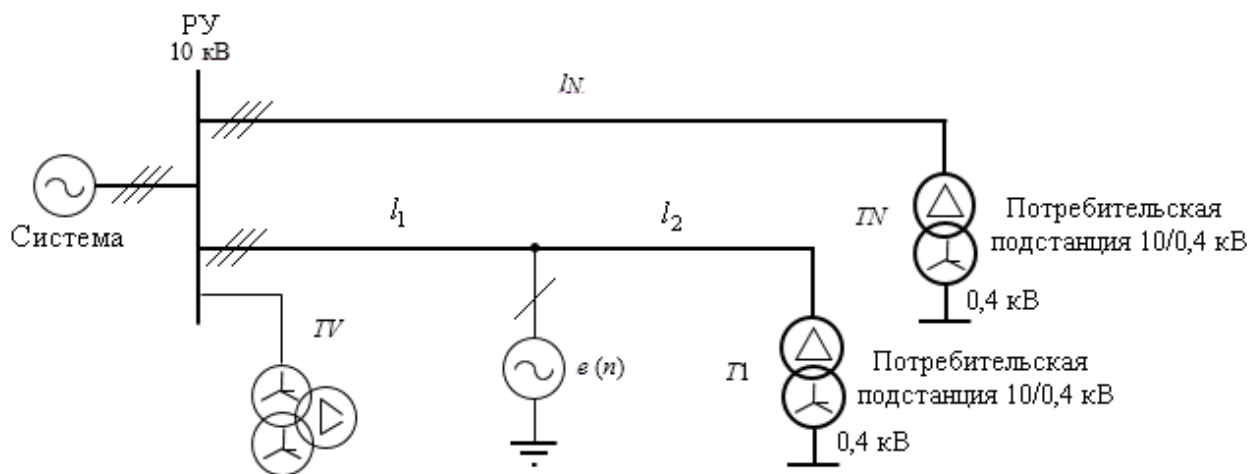


Рис. 1. Принципиальная схема электрической сети

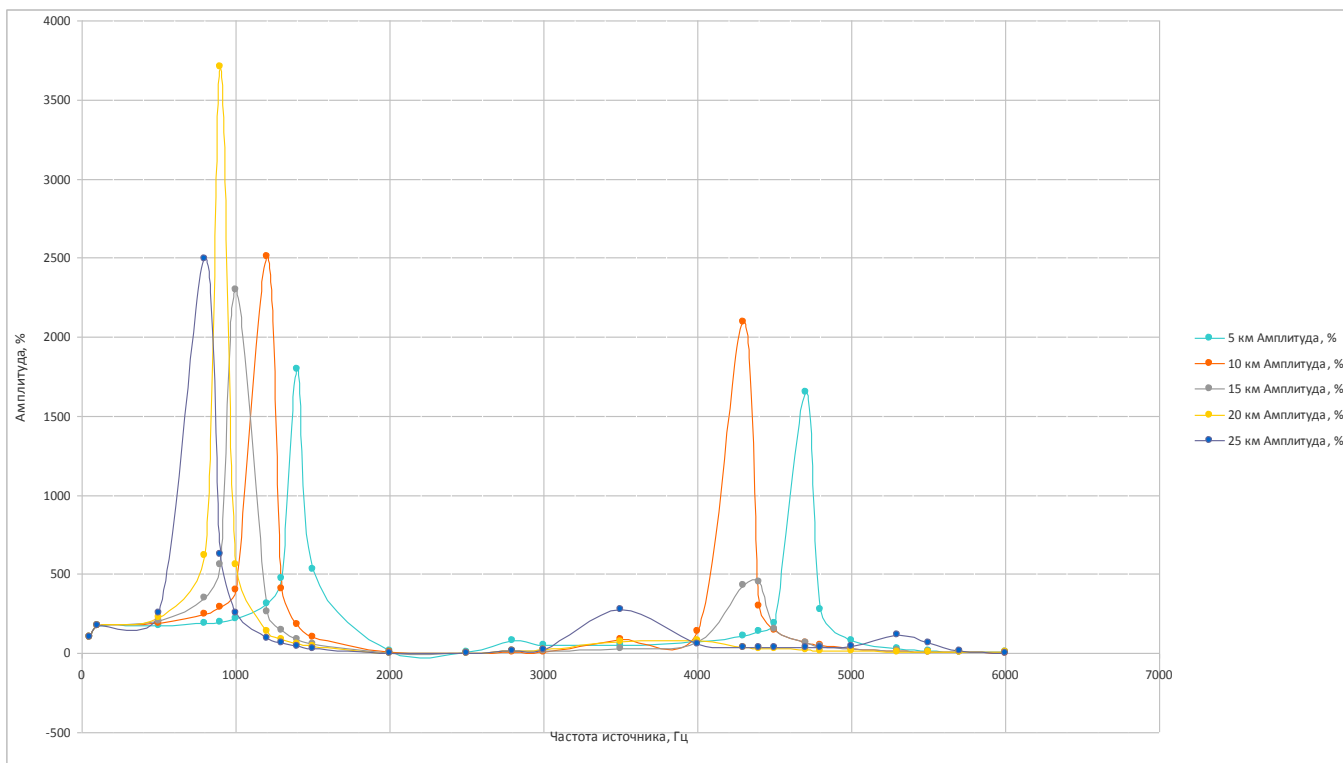


Рис. 2. Частотные характеристики для различных мест ОЗЗ при наличии дополнительной линии длиной 30 км

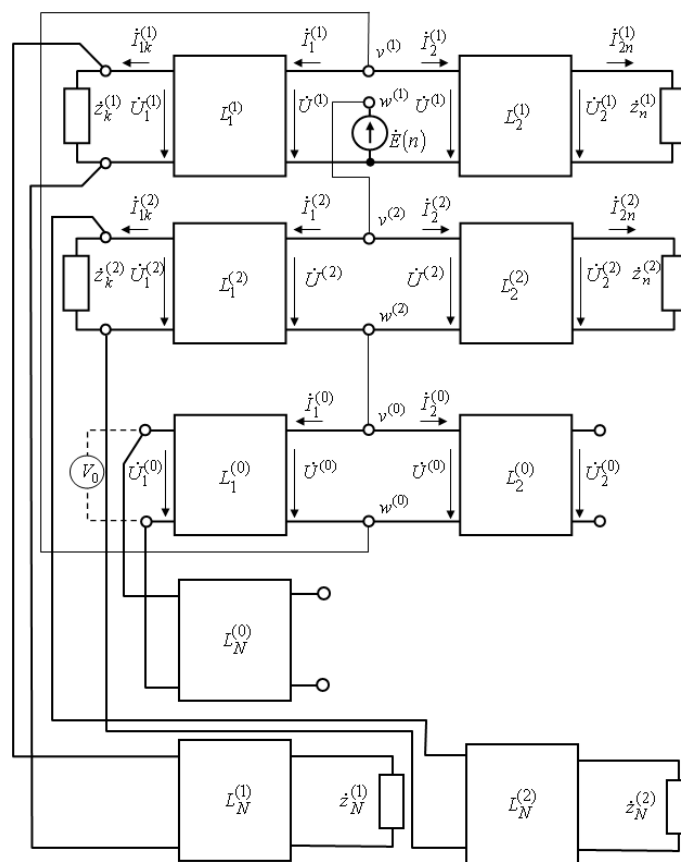


Рис. 3. Схема замещения электрической сети

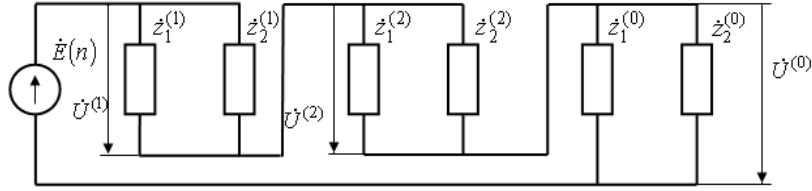


Рис. 4. Комплексная схема замещения электропередачи

Наличие дополнительной линии сказывается на сопротивлении нулевой последовательности головного участка электропередачи поврежденной линии изменением длины l_1 на длину дополнительной линии l_N :

$$\begin{aligned}
 z_1^{(0)} &= \frac{U^{(0)}}{I_1^{(0)}} = \frac{\cos(n\beta^{(0)}l_1) + j \frac{z_c^{(0)}}{z_N^{(0)}} \sin(n\beta^{(0)}l_1)}{\frac{1}{z_N^{(0)}} \cos(n\beta^{(0)}l_1) + \frac{j}{z_c^{(0)}} \sin(n\beta^{(0)}l_1)} = z_c^{(0)} \frac{z_N^{(0)} + jz_c^{(0)} \operatorname{tg}(n\beta^{(0)}l_1)}{z_c^{(0)} + jz_N^{(0)} \operatorname{tg}(n\beta^{(0)}l_1)} = \\
 &= jz_c^{(0)} \frac{\operatorname{ctg}(n\beta^{(0)}l_N) \operatorname{tg}(n\beta^{(0)}l_1)}{1 + \operatorname{ctg}(n\beta^{(0)}l_N) \operatorname{tg}(n\beta^{(0)}l_1)} = jz_c^{(0)} \frac{\cos(n\beta^{(0)}l_N) \cos(n\beta^{(0)}l_1) \sin(n\beta^{(0)}l_N) \sin(n\beta^{(0)}l_1)}{\sin(n\beta^{(0)}l_N) \cos(n\beta^{(0)}l_1) + \cos(n\beta^{(0)}l_N) \sin(n\beta^{(0)}l_1)} = \\
 &= jz_c^{(0)} \operatorname{ctg}(n\beta^{(0)}l_{N1}),
 \end{aligned} \quad (1)$$

где $l_{N1} = l_1 + l_N$

При наличии нескольких параллельно подключенных линий искомая электропередача по нулевой последовательности будет нагружена на параллельно подключенные сопротивления всех остальных линий.

Результирующее сопротивление нулевой проводимости начального участка электропередачи с ОЗЗ равно

$$z_{1\Sigma}^{(0)} = z_c^{(0)} \frac{z_M^{(0)} + jz_c^{(0)} \operatorname{tg}(n\beta^{(0)}l_1)}{z_c^{(0)} + jz_M^{(0)} \operatorname{tg}(n\beta^{(0)}l_1)}. \quad (2)$$

В схеме замещения (рис. 4) имеем для сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$z_{\Sigma}^{(1)} = z_{\Sigma}^{(2)} = z_1^{(1)} // z_2^{(1)} = jz_c \frac{\sin(n\beta l_1) \cos(n\beta l_2)}{\cos(n\beta l)}, \quad (3)$$

$$z_{\Sigma}^{(0)} = z_{1\Sigma}^{(0)} // z_2^{(0)} = -jz_c^{(0)} \frac{\cos(n\beta^{(0)}l_{N1}) \cos(n\beta^{(0)}l_2)}{\sin(n\beta^{(0)}l_{\Sigma})}. \quad (4)$$

При этом $l_{M1} = l_1 + l_N$, $l_{\Sigma} = l + l_N$.

Поскольку $\dot{z}_{\Sigma} = \dot{z}_{1\Sigma}^{(1)} + \dot{z}_{1\Sigma}^{(2)} + \dot{z}_{1\Sigma}^{(0)} = 2\dot{z}_{1\Sigma}^{(1)} + \dot{z}_{1\Sigma}^{(0)}$, для определения значений «резонансных» частот получаем уравнение

$$y = \cos(n\beta^{(0)}l_{N1})\cos(n\beta^{(0)}l_2)\cos(n\beta l) - \frac{2}{\zeta}\sin(n\beta l_1)\cos(n\beta l_2)\sin(n\beta^{(0)}l_{\Sigma}) = 0. \quad (5)$$

На рис. 5 построены графики изменения граничных значений «резонансных» частот при наличии дополнительной линии.

Сплошные линии графиков (рис. 5) относятся к режиму поперечного однофазного включения источника ВГ в начале ВЛ; пунктирные линии соответствуют режиму подключения однофазного источника ВГ в конце ВЛ.

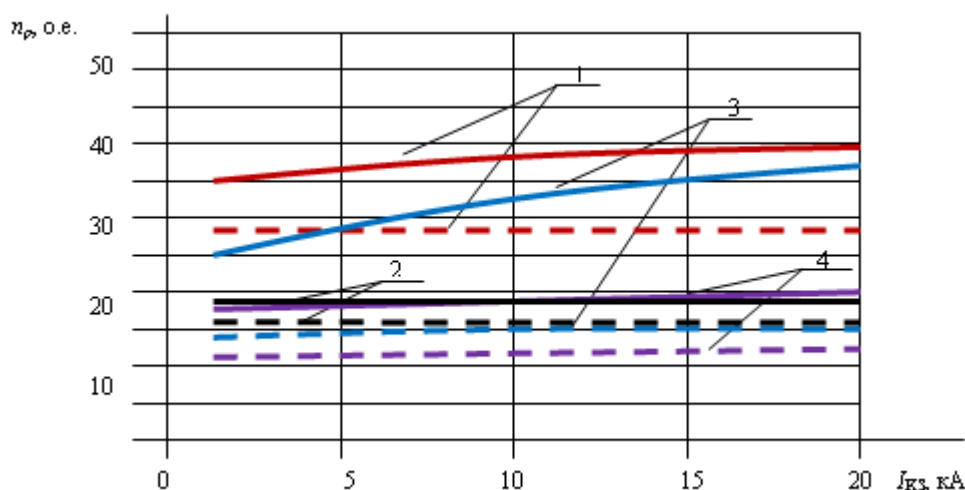


Рис. 5. Граничные значения «резонансных» частот

1 – $l = 10$ км, $l_N = 30$ км; 2 – $l = 10$ км, $l_N = 60$ км; 3 – $l = 30$ км, $l_N = 30$ км;
4 – $l = 30$ км, $l_N = 60$ км

Анализ полученных графиков показывает, что дополнительная линия влияет в целом на снижение уровня значений граничных «резонансных» частот при ОЗЗ в начале электропередачи.

Третья глава посвящена особенностям выделения информативных признаков места повреждения в параметрах режимов. На рис. 6 в качестве примера представлен спектральный состав напряжений в частотном диапазоне 0 – 30 кГц. Имеется совпадение «резонансных» гармоник с теоретически рассчитанными на основе математической модели линии (рис. 2).

Для определения частотной области разрабатываемых сенсоров на основе полученных спектрограмм можно сделать вывод, что вполне достаточно частотный диапазон до 10 кГц, в который укладывается не менее 5 «резонансных» гармоник. Показано, что наименьшую мощность имеет сигнал на «резонансной» гармонике на том ответвлении ВЛ от магистрали, на котором произошло ОЗЗ, что позволяет её однозначно идентифицировать.

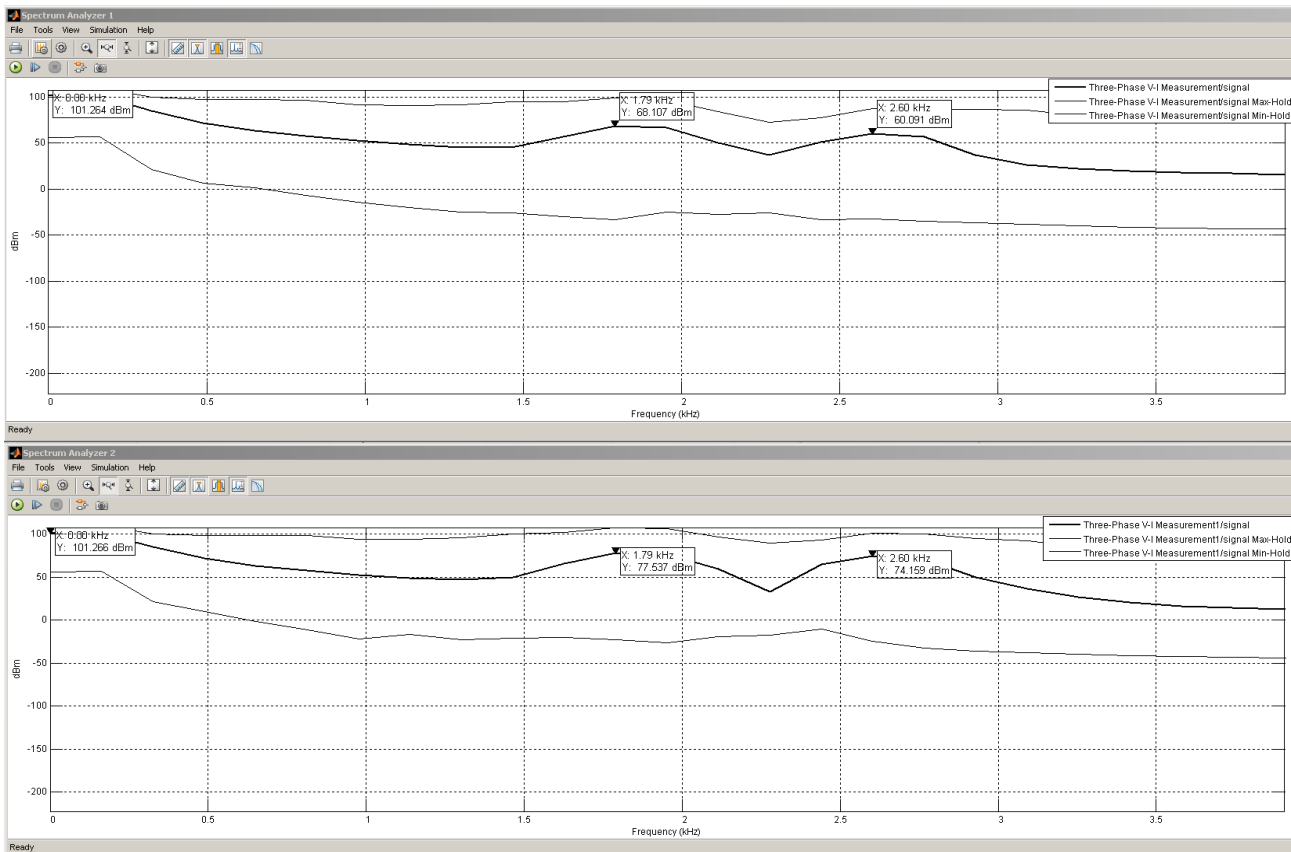


Рис. 6. Спектральная мощность сигнала в начале и в конце линии, $l_1=25$ км

Были выполнены математические эксперименты на имитационной модели магистрали и на отпайках 6 подстанций. Рассматривались три режима: 1 - ОЗЗ на магистрали в точке начала отпайки, 2 - на половине длины отпайки и 3 - ОЗЗ непосредственно на вводе трансформатора подстанции. Результаты представлены на диаграммах рис. 7 и рис. 8 для первых двух «резонансных» гармоник, которые были выделены на спектрограммах для каждого узла измерений на стороне 10 кВ. По оси ординат единицы измерения – dbm. Узлы на рисунках распределены в порядке подключения отпаек к магистрали. Узел 1

соответствует шинам ЦП. Рядам с номерами 1,2,3 на рис. 8 и 9 соответствуют упомянутые выше режимы 1, 2, 3.

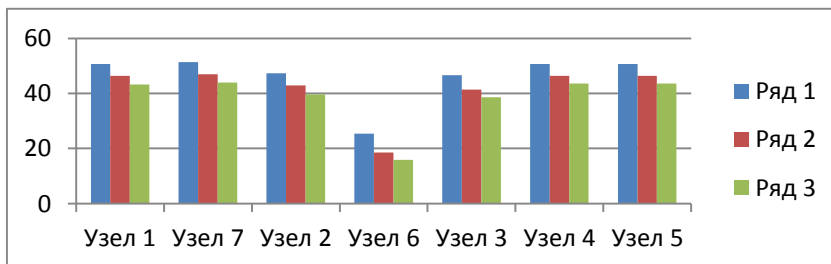


Рис. 7. Диаграмма изменения первых «резонансных» частот

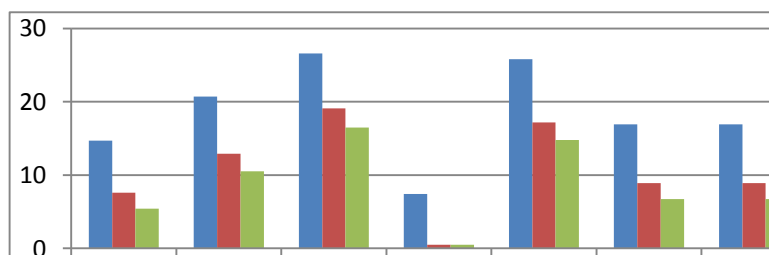


Рис. 8. Диаграмма изменения вторых «резонансных» частот

Диаграммы показывают, что наименьший уровень гармоник, как это и следует из теоретических исследований, будет на той ТП, на отпайке к которой ОЗЗ. На рис. 9 представлена спектрограмма мощности сигнала на одной из подстанций одновременно для стороны высшего и низшего напряжений.

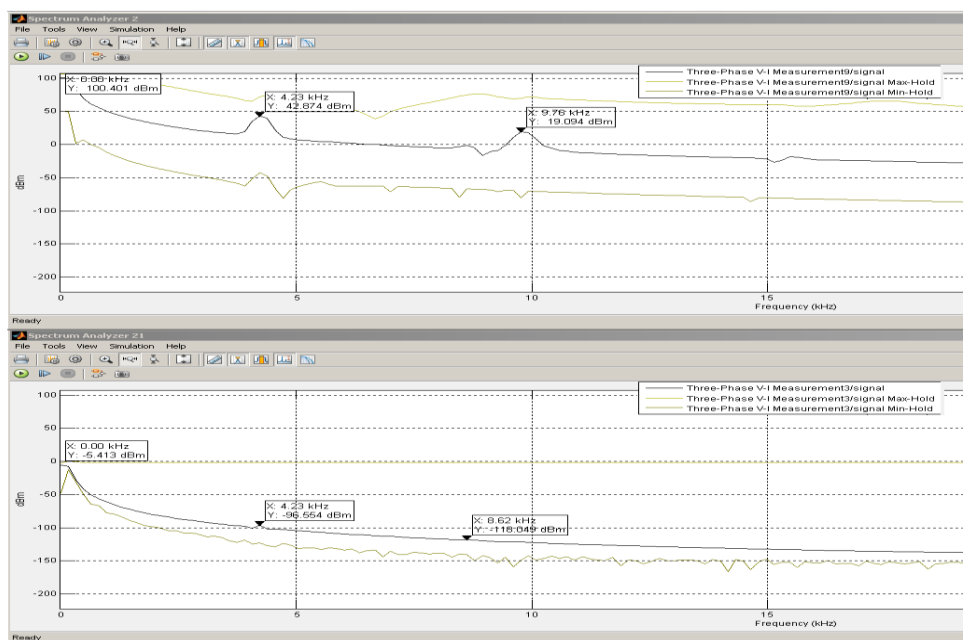


Рис. 9. Фрагмент спектров мощности сигнала на стороне высшего и низшего напряжений ТП

Также в диссертации на имитационной модели была рассмотрена возможность определения участка с ОЗЗ в электрической сети с учетом нагрузки на подстанциях. Исследования показали, что задача решается сравнением уровня напряжения на стороне 0,4 кВ с точностью до длины отпайки.

Четвертая глава. Для сопоставления модельных экспериментов по выделению информативных признаков ОЗЗ с практикой были выполнены натурные эксперименты (рис. 10). Дуговой разряд воспроизводился на расстоянии 25 км от шин центра питания вблизи конца магистрали.



Рис. 10. Экспериментальная установка, смонтированная на промежуточной опоре ВЛ 10 кВ: а) общий вид; б) горение перемежающейся дуги

На рис. 11 приведен спектр напряжения, записанного на трансформаторе напряжения, установленного на подстанции «Чепчуги» в РЭС с древовидной структурой. По оси абсцисс на рис.11 отложена частота в Гц, по оси ординат – напряжение в В. На рис. 12 представлен частотный анализа напряжения 0,4 кВ при ОЗЗ на воздушной линии 10 кВ, подтвердивший теоретически предсказанную возможность наблюдения «резонансных» гармоник на стороне 0,4 кВ подстанций.

Далее в диссертации раскрываются особенности разработки идентификации места ОЗЗ на основе нечеткой логики. На рис. 13 представлено диалоговое окно FIS редактора с основной структурой нечеткой системы на основе алгоритма Мамдани. На рис. 14 приведена структурная схема разработанной системы ранней диагностики ОЗЗ на примере одно фидерной схемы.

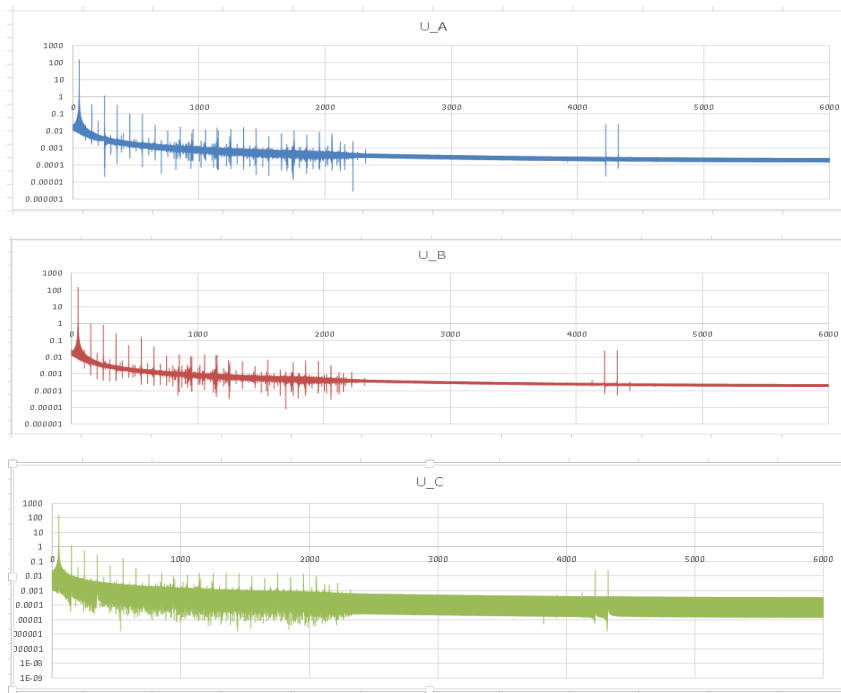


Рис. 11. Частотный анализ напряжения в начале фидера ВЛ 10 кВ

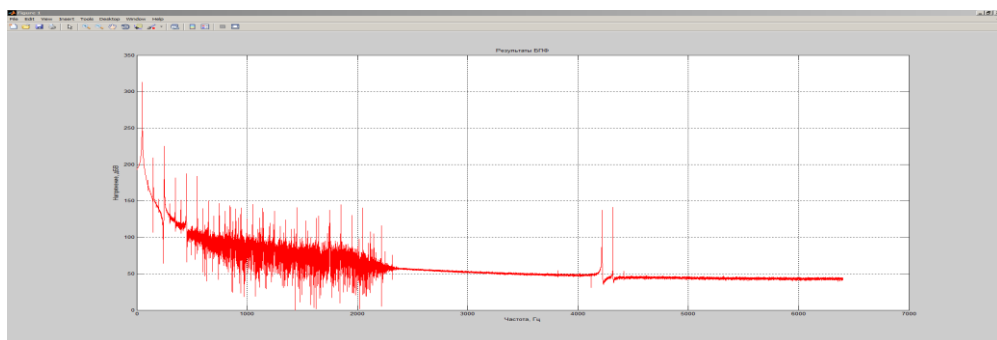


Рис. 12. Спектр напряжений на фазе «С» на стороне 0,4 кВ подстанции

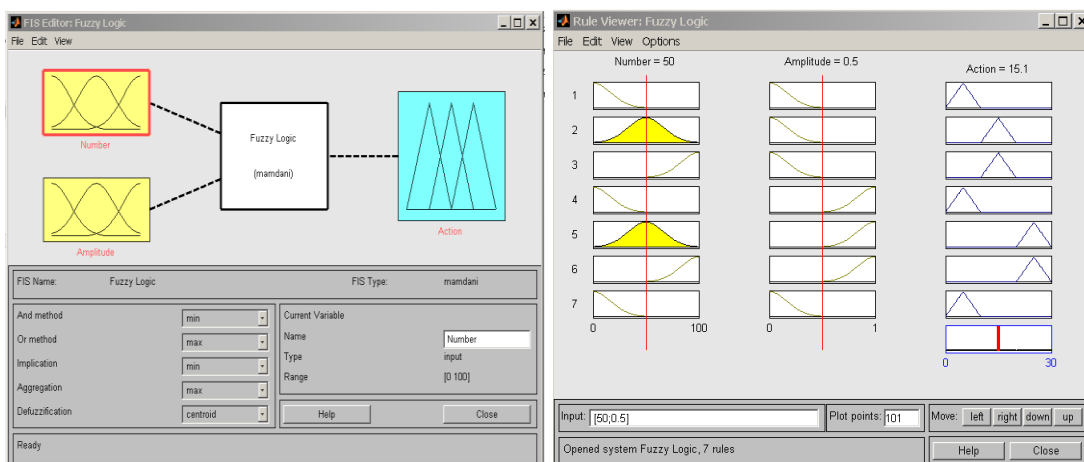


Рис. 13. Диалоговые окна функционирования нечеткой системы

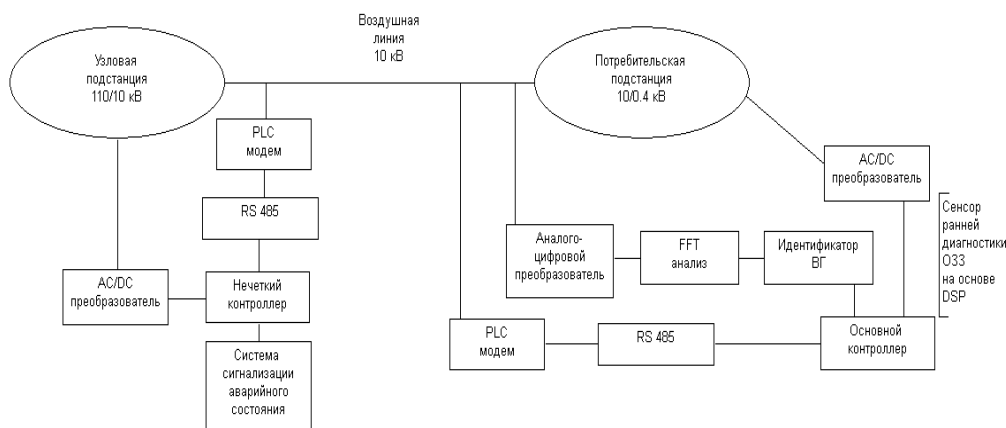


Рис. 14. Структурная схема системы диагностики ОЗЗ на примере одно фидерной схемы

В основу системы ранней диагностики ОЗЗ предложен сенсор, устанавливаемый на потребительских подстанциях, в функционал которого входят такие процессы, как преобразование получаемого сигнала с каждой из трех фаз в цифровой вид; обработка полученного цифрового сигнала с помощью *FFT*-анализа; при выявлении ВГ в спектре сигнала осуществление передачи данных по *PLC*-каналу на узловую подстанцию. В программном коде прописано непосредственное снятие сигнала с каждой из трех фаз и их *FFT*-анализ в режиме реального времени; при выявлении ВГ в спектре сигнала передача данных по *PLC*-каналу на узловую подстанцию. В программном коде прописано непосредственное снятие сигнала с каждой из трех фаз и их *FFT* анализ в режиме реального времени.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Дуговое ОЗЗ инициирует возникновение широкого спектра высших гармоник в параметрах режима электрической сети. Теоретические исследования показали, что в режимах поперечной несимметрии также возможно усиление определенных высших гармоник тока и напряжения, как и в симметричных режимах работы воздушных линий четвертьволновой длины. В результате «резонансные» гармоники были приняты как информационный признак ОЗЗ, зависящий от расстояния до места повреждения. Показано, что электрическая сеть, питающаяся от шин распределительного устройства, оказывает влияние на значения

«резонансных» частот поврежденного фидера. Предложено его учитывать в виде эквивалентной дополнительной линии.

Имитационное моделирование воздушных линий в режимах с ОЗЗ позволило произвести оценку уровня информационных признаков ОЗЗ на стороне 0,4 кВ понижающих подстанций и показало необходимость наличия как высоковольтных, так и низковольтных сенсоров. Разработан и испытан высоковольтный сенсор тока. Предложена система распознавания «резонансных» гармоник и определения поврежденных участков электропередачи с использованием методов нечеткой логики.

Выполненные натурные эксперименты дугового ОЗЗ в действующей электрической сети 10 кВ подтвердили теоретические положения о возникновении «резонансных» гармоник и возможности их наблюдения на стороне 0,4 кВ понижающих подстанций.

ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛАХ ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК

1. Абдуллин Л.И. Экспериментальное исследование проявления высших гармоник напряжения на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций как метода ранней диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью / Вагапов Г.В., Амосов А.М., Чернова Н.В., Абдуллин Л.И. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2014. – №4. – С. 89-92 (общий объем – 0,25 п.л., личный вклад – 0,06 п.л.).

2. Абдуллин Л.И. Раннее выявление замыканий на землю по параметрам напряжения на приемных подстанциях / Л.И. Абдуллин // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2013. – №11-12. – С. 133-136 (0,25 п.л.).

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

3. Абдуллин Л.И. Система определения места однофазного замыкания на землю / А.И. Федотов, Г.В. Вагапов, Л.И. Абдуллин // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в РТ «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли»: сб. мат. докл. Альметьевск: Альметьевский гос. нефтяной ин-т. 2016. Т.2. С. 258-261 (общий объем – 0,473 п.л., личный вклад – 0,23 п.л.).

4. Абдуллин Л.И. Диагностические признаки однофазного замыкания на землю / А.И. Федотов, Н.В. Чернова, Г.В. Вагапов, Л.И. Абдуллин // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в РТ «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли»: сб. мат. докл. Альметьевск: Альметьевский гос. нефтяной ин-т. 2016. Т.2. С. 261-265 (общий объем – 0,473 п.л., личный вклад – 0,23 п.л.).

5. Абдуллин Л.И. Определение признаков однофазного замыкания на землю / А.И. Федотов, Г.В. Вагапов, Л.И. Абдуллин // VII Междунар. молодежная науч.-техн. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи - 2016»: сб. мат. докл. Казань, 2016. Т.1. С. 222-224 (общий объем – 0,187 п.л., личный вклад – 0,1 п.л.).

6. Абдуллин Л.И. Закономерности изменения «резонансных» частот электропередачи в условиях однофазной поперечной несимметрии / А.И. Федотов, Г.В. Вагапов, Л.И. Абдуллин // 8 Междунар. науч.-техн. конф. «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов»: сб. мат. докл. Благовещенск, 2015. С. 24-30 (общий объем – 0,473 п.л., личный вклад – 0,23 п.л.).

7. Абдуллин Л.И. Резонансные частоты электропередачи / А.И. Федотов, Г.В. Вагапов, Л.И. Абдуллин // XI Всерос. науч.-техн. конф. «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем»: сб. мат. докл. Чебоксары, 2015. С. 335-336 (общий объем – 0,0625 п.л., личный вклад – 0,03 п.л.).

8. Абдуллин Л.И. Моделирование защиты от ОЗЗ в РЭС на основе нечеткой логики / Л.И. Абдуллин // 8 Междунар. науч.-практ. конф. «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике»: сб. мат. докл. Казань, 2014. С. 64-66 (общий объем – 0,187 п.л.).

9. Абдуллин Л.И. Экспериментальное исследование однофазных замыканий на землю / Абдуллин Л.И., Федотов А.И. // IX Междунар. молодежная науч.-техн. конф. «Гинчуринские чтения»: сб. мат. докл. Казань, 2014. Т.1. С. 24-25 (общий объем – 0,0625 п.л., личный вклад – 0,05 п.л.).

10. Абдуллин Л.И. Исследование замыканий в районных распределительных сетях с изолированной нейтралью / Г.В. Вагапов, Р.Э. Абдуллазянов, Л.И. Абдуллин // Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние

и перспективы развития электротехнологии»: сб. мат. докл. Иваново, 2013. Т.1. С. 238-239 (общий объем – 0,125 п.л., личный вклад – 0,05 п.л.).

11. Абдуллин Л.И. Исследование параметров качества электрической энергии в распределительных сетях для повышения эффективности их функции / Г.В. Вагапов, Л.И. Абдуллин, И.И. Ахатов // IX Междунар. науч.-практ. конф. «Новита за напредвали наука»: сб. мат. докл. София, 2013.Т. 58. С. 28-31 (общий объем – 0,25 п.л., личный вклад – 0,1 п.л.).

12. Абдуллин Л.И. Моделирование режимов в многофидерных схемах распределительных электрических сетей / Г.В. Вагапов, Л.И. Абдуллин // XLIII Междунар. науч.-практ. конф. «Федоровские чтения»: сб. мат. докл. М., 2013. С. 106-109 (общий объем – 0,25 п.л., личный вклад – 0,15 п.л.).

13. Абдуллин Л.И. Нечеткие алгоритмы функционирования защиты от ОЗЗ / Г.В. Вагапов, Л.И. Абдуллин // IV Междунар. науч.-практ. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи - 2013»: сб. науч. трудов. Новочеркасск, 2013.Т.1. С. 17-19 (общий объем – 0,187 п.л., личный вклад – 0,2 п.л.).

Подписано к печати 11.10.2017г.	Вид печати РОМ	Формат 60×84/16
Гарнитура «Times»	Усл. печ. л. 1.16	Бумага офсетная
Тираж 100 экз.	Заказ № 5073	Уч.-изд. л. 1.0

Типография КГЭУ
420066, Казань, Красносельская, 51