

На правах рукописи



КОСТАРЕВ Илья Андреевич

**РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА
ЗЕМЛЮ, ОСНОВАННОЙ НА КОНТРОЛЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ
МОЩНОСТИ, КОМПЕНСИРОВАННЫХ СЕТЕЙ 6-35 кВ**

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре «Горная электромеханика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, профессор
САПУНКОВ Михаил Леонидович

Официальные оппоненты:

РЫЖКОВА Елена Николаевна,
доктор технических наук, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет – МЭИ»,
профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»;

СУВОРОВ Антон Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доцент кафедры «Автоматизированные электрические системы»

Ведущая организация:

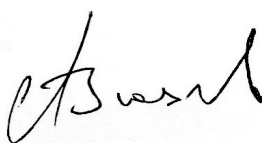
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск

Защита состоится 20 мая 2015 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан 18 марта 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Зюзев Анатолий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В структуре электрических сетей России наибольшую часть представляют сети среднего напряжения (6-35 кВ). Общая протяженность таких сетей составляет более 4 млн. км., а их количество – более 25000 единиц. Большая часть электрической энергии в нашей стране распределяется посредством сетей 6-35 кВ. Следовательно, обеспечение надежности и безопасности этих сетей, обеспечение бесперебойности питания потребителей являются приоритетными задачами электроэнергетики России.

Для выполнения этих задач, в частности, необходимо своевременное обнаружение и устранение однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), как наиболее распространенного вида повреждения (80-90% от общего числа аварийных повреждений). При длительном существовании данный вид замыканий в 60-80% случаев может переходить в двухместное, двойное замыкание на землю и даже в трехфазное короткое замыкание, что, в свою очередь, приводит к неоправданным отключениям линий, дорогостоящим ремонтам, перерывам в электроснабжении и, как следствие, к простоем оборудования и значительному экономическому ущербу.

Для обнаружения возникновения ОЗЗ и предотвращения развития повреждения необходимо применение быстродействующей селективной защиты, которая должна работать либо на сигнализацию, либо на отключение поврежденной линии. Многие специалисты в данной области склонны к мнению, что защита от ОЗЗ должна работать на отключение вне зависимости от режима заземления нейтрали, тем самым подчеркивая значимость данных повреждений и их последствий. Это обуславливает повышенные требования к защите в части чувствительности и селективности. Большинство специалистов также склонно к мнению, что защита должна быть совместимой для определения поврежденной линии при любом виде ОЗЗ (устойчивом дуговом, перемежающемся дуговом, металлическом замыкании или замыкании через переходное сопротивление).

Изучению вопросов в области релейной защиты и автоматики посвящено много работ отечественных ученых, таких как: А.М. Федосеев, Ф.А. Лихачев, В.А. Андреев, М.А. Шабад, Е.Ф. Цапенко, А.И. Шалин, И.М. Сирота, Г.А. Евдокунин, В.К. Обабков, Л.Е. Дударев, В.М. Кискачи, К.П. Кадомская, В.А. Шуин, Р.А. Вайнштейн, Л.И. Сарин, В.Ф. Лачугин, И.Н. Попов и др.

Для компенсированных сетей проблема достоверного обнаружения ОЗЗ является наиболее сложной в связи с рядом специфических свойств такого заземления нейтрали. Для таких сетей характерны: большая величина емкостного тока и возможность длительного дугового замыкания; малая величина остаточного тока ОЗЗ, особенно при резонансной настройке компенсации; фазовые углы между током и напряжением нулевой последовательности основной гармоники на поврежденной и неповрежденной линиях могут быть одинаковыми; возможны большие и нестабильные расстройки компенсации из-за неудовлетворительной работы автоматики дугогасящего реактора (ДГР); большая вероятность неустойчивых замыканий.

В таких сетях многие известные защиты от ОЗЗ работают недостаточно селективно. Поэтому задача разработки высокочувствительной селективной защиты от ОЗЗ для компенсированных сетей 6-35 кВ остается актуальной и в настоящее время.

В качестве такой защиты от ОЗЗ может найти применение новая защита, основанная на контроле пульсирующей мощности, разрабатываемая в ПНИПУ (г.Пермь).

Представляется актуальной проработка ряда вопросов, связанных с исследованием факторов, влияющих на селективность работы этой защиты, оценкой чувствительности за-

щиты для разного вида замыканий на землю, а также разработкой мероприятий по обеспечению устойчивости функционирования защиты.

Цель работы – научное обоснование успешности применения защиты от ОЗЗ, основанной на контроле пульсирующей мощности, в компенсированных сетях 6-35 кВ. Разработка рекомендаций по обеспечению устойчивости функционирования этой защиты.

Основные задачи работы:

– разработать математическую модель распределительной сети 6-35 кВ с компенсированной нейтралью, отражающую основные процессы установившихся ОЗЗ, на учете которых основан алгоритм функционирования новой защиты;

– оценить влияние на устойчивость функционирования защиты возможных неблагоприятных для ее работы факторов: возможной асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю; несимметрии напряжений источника питания; конфигурации сети;

– провести исследование влияния степени расстройки компенсации емкостных токов на устойчивость функционирования защиты;

– оценить влияние высших гармоник в сети на устойчивость функционирования защиты;

– обосновать выбор величины сопротивления резистора для комбинированного заземления нейтрали по условию гарантированного обеспечения устойчивости функционирования защиты;

– разработать математическую модель распределительной сети 6-35 кВ с компенсированной нейтралью для исследования устойчивости функционирования защиты от ОЗЗ при перемежающихся замыканиях на землю;

– разработать опытный образец устройства защиты от ОЗЗ и провести экспериментальные исследования качества работы защиты на физической модели компенсированной сети.

Объект исследования – защита распределительных компенсированных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ.

Предмет исследования – новый принцип защиты от ОЗЗ распределительных сетей 6-35 кВ, основанный на контроле изменений пульсирующей мощности.

Методы исследования – математический метод сопряженных комплексных амплитуд, методы математического и имитационного моделирования с применением современных компьютерных технологий; экспериментальные исследования путем физического моделирования в лабораторных условиях с использованием опытного образца устройства новой защиты.

Достоверность результатов исследования – адекватность моделей и методов, используемых в диссертационной работе, подтверждается известными фундаментальными теориями и методами исследования процессов при однофазных замыканиях на землю, результатами вычислительных и натурных экспериментов.

Научная новизна работы:

- 1) теоретически обоснована возможность применения новой защиты от ОЗЗ в сетях 6-35 кВ с компенсированной нейтралью;

- 2) исследовано влияние на устойчивость функционирования защиты от ОЗЗ неблагоприятных факторов, таких как: асимметрия собственных проводимостей фаз линий на землю; возможная несимметрия напряжений источника питания; неоднородная конфигурация сети (различные значения показателей доли емкостей фаз относительно земли линий в суммарной емкости сети);
- 3) проведена оценка влияния степени расстройки компенсации и высших гармоник токов и напряжений на устойчивость функционирования защиты;
- 4) разработаны рекомендации по выбору величины сопротивления резистора для комбинированного заземления нейтрали, необходимой для гарантированного обеспечения устойчивости функционирования защиты от ОЗЗ;
- 5) теоретически и путем моделирования обоснована работоспособность новой защиты при перемежающихся ОЗЗ;
- 6) разработан опытный образец микропроцессорного устройства защиты от ОЗЗ, экспериментально доказана высокая эффективность работы новой защиты в компенсированной сети как при устойчивых, так и при перемежающихся замыканиях на землю.

Практическая значимость и реализация результатов работы. Применен новый принцип защиты от ОЗЗ путем контроля приращений пульсирующих мощностей защищаемых линий в компенсированных сетях 6-35 кВ. Разработано устройство защиты, реализованное на базе современного микроконтроллера. Опытный образец устройства апробирован на физической модели распределительной сети 6-35 кВ с компенсированной нейтралью. Результаты испытаний опытного образца защиты от ОЗЗ свидетельствуют о возможности создания промышленных терминалов новой высокоэффективной защиты.

Разработаны научно обоснованные рекомендации для обеспечения устойчивости функционирования защиты от ОЗЗ в компенсированных сетях.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) математические модели распределительной компенсированной сети 6-35 кВ для устойчивых и перемежающихся замыканий на землю, отражающие основные процессы, на которых основан алгоритм функционирования защиты;
- 2) результаты исследований и оценки влияния на устойчивость функционирования защиты от ОЗЗ асимметрии проводимостей фаз линий на землю, несимметрии источника питания, конфигурации сети, степени расстройки компенсации реактора, высших гармоник сети;
- 3) результаты оценки и рекомендации по выбору величины сопротивления резистора для комбинированного заземления нейтрали, необходимой для гарантированного обеспечения устойчивости функционирования защиты от ОЗЗ, основанной на контроле пульсирующей мощности;
- 4) результаты исследований работы защиты при перемежающихся ОЗЗ;
- 5) результаты исследований опытного образца устройства защиты на физической модели компенсированной сети.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, и региональных научно-технических конференциях: международная научная конференция «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2012, 2013, 2014 г.); международная научно-практическая конференция «Федоровские чтения» (г. Москва, 2011, 2013 г.); международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами мо-

лодежи» (г. Екатеринбург, 2012 г.); международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» (г. Екатеринбург, 2014 г.); международная научно-техническая конференция «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2011, 2012 г.); международная научно-практическая конференция «Энергосбережение, энергопотребление, энергоэффективность. Возобновляемые источники энергии» (г. Пермь, 2012 г.); международная научная конференция «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности» (г. Пермь, 2012, 2013 г.); международная научно-практическая конференция «Горная электромеханика» (г. Пермь, 2014 г.); всероссийская научно-техническая конференция «Нефтегазовое и горное дело» (г. Пермь, 2011, 2012, 2014 г.); всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2012 г.); краевая научно-техническая конференция «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (г. Пермь, 2012 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в т.ч. 4 статьи в изданиях списка ВАК РФ, получены 2 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 82 наименований и двух приложений. Общий объем работы составляет 171 страницу и содержит 43 рисунка и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность работы, сформулированы цели и задачи научного исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту и их научная новизна, приведены сведения об апробации работы.

В первой главе приведена характеристика компенсированных сетей 6-35 кВ, а также результаты аналитического обзора известных принципов и устройств защиты таких сетей от ОЗЗ, отмечены их достоинства и недостатки, поставлены цели и задачи диссертационной работы. К числу широко известных защит компенсированных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ, применяемых как в России, так и за рубежом, относятся защиты, основанные на контроле: направления мощности НП в установившемся режиме; характеристик и параметров переходного процесса при ОЗЗ; высших гармонических составляющих в токах НП линий; а также защиты с использованием дополнительных «наложенных» токов и комбинированные принципы защиты и их модификации.

На основании результатов проведенного аналитического обзора состояния защиты компенсированных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ сделано заключение о неудовлетворительной ситуации по селективному определению поврежденной линии при замыканиях на землю. Известные принципы защиты, используемые в устройствах защит от ОЗЗ, на практике характеризуются возможными отказами в работе и ложными срабатываниями при определенных видах замыкания на землю, конфигурации сети, коммутационных помехах, феррорезонансных процессах, искажениях измерительных трансформаторов, наличии переходного сопротивления в месте замыкания на землю и т.д. Поэтому можно констатировать, что существующие защиты от ОЗЗ не могут обеспечивать в полной мере достоверного определения поврежденной линии в сетях 6-35 кВ с учетом требований, предъявляемых к защитами, и применимы лишь со значительными ограничениями в эксплуатации.

Поэтому задача разработки высокочувствительной селективной защиты от ОЗЗ для компенсированных сетей 6-35 кВ весьма актуальна.

Как отмечалось выше, к числу таких защит от ОЗЗ может быть отнесена исследуемая в диссертационной работе новая защита, основанная на контроле пульсирующей мощности.

Во второй главе проведено описание принципа защиты от ОЗЗ путем контроля приращений пульсирующей мощности, а также описание разработанной математической модели компенсированной сети, характеризующей функционирование новой защиты при устойчивых замыканиях на землю. Приведены результаты исследований влияния на устойчивость функционирования защиты асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю, несимметрии линейных напряжений источника питания и показателей доли емкостей фаз относительно земли защищаемых линий в суммарной емкости сети.

В основе принципа действия рассматриваемой защиты используется качественно новый способ определения поврежденной линии при ОЗЗ, а именно, контроль приращения пульсирующей мощности каждой защищаемой линии сети.

Согласно алгоритму функционирования защиты для каждой k -ой линии распределительной сети необходимо измерять мгновенные значения линейных напряжений сети и токи трех фаз этой линии (рисунок 1). Для этих целей служит общий для всех линий измерительный блок 1 и блоки 2_k отдельно для каждой линии. Сигналы с блоков 1 и 2_k поступают на блок 4, предназначенный для вычисления мгновенного значения пульсирующей мощности k -ой линии согласно выражению

$$P_{Пк}(t) = p_k(t) - P_{СРк}, \quad (1)$$

где $p_k(t) = u_{AB}(t) \cdot i_{Ak}(t) + u_{BC}(t) \cdot i_{Bk}(t) + u_{CA}(t) \cdot i_{Ck}(t)$ – суммарная мгновенная мощность k -ой линии; $u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}, i_{Ak}, i_{Bk}, i_{Ck}$ – мгновенные значения напряжений источника питания и токов трех фаз k -ой линии; $P_{СРк} = 1/T_{СР} \int_0^{T_{СР}} p_k(t) dt$ – среднее значение мгновенной мощности k -ой линии (активная мощность).

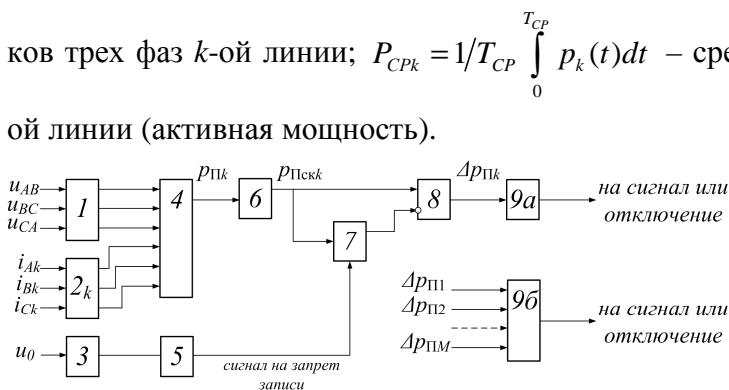


Рисунок 1 - Структурно-функциональная схема алгоритма защиты k -ой линии

Вычисленное в блоке 4 мгновенное значение пульсирующей мощности (1) поступает на блок 6, на выходе которого формируется среднеквадратичное значение пульсирующей мощности $P_{Пскк} =$

$$= \sqrt{1/T_{ск} \int_0^{T_{ск}} p_{Пк}^2(t) d(t)}.$$

Действующее значение пульсирующей мощности в нормальном режиме непрерывно запоминается в блоке записи 7. При возникновении ОЗЗ запоминание в блоке 7 останавливается и далее с помощью сумматора 8 определяется приращение мощности:

$$\Delta p_{Пк} = P_{Пскк}^{(1)} - P_{Пскк}, \quad (2)$$

где $P_{Пскк}^{(1)}$ – значение пульсирующей мощности k -ой линии в режиме ОЗЗ.

Приращение пульсирующей мощности поступает на вход исполнительного органа 9 (9а или 9б), который формирует сигнал на отключение или сигнализацию.

Факт возникновения режима ОЗЗ определяется с помощью блоков 3 и 5 следующим образом: мгновенное значение напряжения нулевой последовательности поступает на вход измерительного блока 3, на выходе которого формируется сигнал действующего значения напряжения нулевой последовательности; далее сигнал с блока 3 поступает на пусковой ор-

ган защиты 5, формирующий сигнал на «запрет записи» блока 7 в случае превышения действующего значения напряжения нулевой последовательности уставки.

В зависимости от вида исполнительного органа 9 защита от ОЗЗ может работать в двух возможных вариантах алгоритма: в варианте, основанном на принципе сравнения контролируемых защитами линий приращений мощности с уставками на срабатывание защиты (абсолютный принцип) - блок 9а; в варианте, основанном на принципе относительного сравнения приращений пульсирующей мощности между собой всех защищаемых линий данной секции шин (принцип максиселектора или относительный принцип) - блок 9б.

Из двух возможных вариантов алгоритма работы исполнительного органа защиты от ОЗЗ предпочтение отдается относительному принципу по следующим основным причинам: идентификация поврежденной линии посредством сравнения приращений мощности всех защищаемых линий между собой проще, так как не требует предварительных расчетов уставок на срабатывание; относительный принцип обеспечивает большую чувствительность защиты; реализация относительного принципа будет менее затратная.

Однако при использовании принципа максиселектора в алгоритме работы защиты необходимо предварительно вводить данные об установленных трансформаторах тока для каждой защищаемой линии.

Разработанная математическая модель компенсированной сети позволила провести исследования и сделать оценку влияния на качество работы защиты от ОЗЗ следующих неблагоприятных факторов: асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю; несимметрии линейных напряжений источника питания; показателей доли емкостей фаз относительно земли защищаемых линий.

Основные расчетные выражения для приращений пульсирующих мощностей на поврежденной и любой неповрежденной линиях при установившихся процессах ОЗЗ в компенсированной сети получены в виде:

- для поврежденной линии (индекс α):

$$\Delta \dot{P}_{\Pi\alpha} = \dot{U}_{\text{Л}} \Delta \dot{U}_{\Phi(3)} (d_{\Sigma} + j) m_{\alpha} \omega C_{\Sigma} (\dot{\sigma}_{\alpha} + \dot{\epsilon}_{U2} \sigma_{\alpha}^*) + \dot{U}_{\text{Л}} \dot{I}_3^{(1)}, \quad (3)$$

- для любой неповрежденной линии (индекс β):

$$\Delta \dot{P}_{\Pi\beta} = \dot{U}_{\text{Л}} \Delta \dot{U}_{\Phi(3)} (d_{\Sigma} + j) \dot{\sigma}_{\beta} m_{\beta} \omega C_{\Sigma} (\dot{\sigma}_{\beta} + \dot{\epsilon}_{U2} \sigma_{\beta}^*), \quad (4)$$

где $\dot{U}_{\text{Л}}$ – комплекс линейного напряжения сети; $\Delta \dot{U}_{\Phi(3)}$ – комплекс изменения напряжений фаз относительно земли, обусловленного возникновением замыкания на землю; $\dot{I}_3^{(1)}$ – комплекс тока ОЗЗ; $d_{\Sigma} = g_{\Sigma} / \omega C_{\Sigma}$ – относительная активная проводимость на землю (коэффициент демпфирования), обусловленная суммарной активной проводимостью фаз всех линий на землю g_{Σ} ; m_{α}, m_{β} – показатели доли емкостей фаз относительно земли соответственно для линии α и линии β в суммарной емкости сети C_{Σ} ; ω – круговая частота; $\dot{\epsilon}_{U2}$ – комплексный показатель несимметрии по напряжению обратной последовательности источника питания; $\dot{\sigma}_{\alpha}, \dot{\sigma}_{\beta}, \sigma_{\alpha}^*, \sigma_{\beta}^*$ – комплексные показатели и сопряженные комплексные показатели асимметрии емкостей фаз относительно земли соответственно для линии α и линии β , которые определяются согласно выражениям:

$$\dot{\sigma}_{\alpha} = \frac{C_{A\alpha} + a^2 C_{B\alpha} + a C_{C\alpha}}{C_{\Sigma\alpha}}; \dot{\sigma}_{\beta} = \frac{C_{A\beta} + a^2 C_{B\beta} + a C_{C\beta}}{C_{\Sigma\beta}}, \quad (5)$$

где $C_{A\alpha}, C_{B\alpha}, C_{C\alpha}, C_{A\beta}, C_{B\beta}, C_{C\beta}$ – емкости фаз относительно земли соответственно поврежденной линии α и неповрежденной линии β ; $C_{\Sigma\alpha}, C_{\Sigma\beta}$ – суммарные емкости фаз относительно земли соответственно поврежденной линии α и неповрежденной линии β .

Выражение для комплекса изменения напряжений фаз относительно земли имеет вид:

$$\Delta \dot{U}_{\phi(3)} = \frac{\frac{U_{II}}{R_{II}} [(Y_{B(3)\Sigma} + \lambda Y_{Bmp})(1 + \dot{\epsilon}_{U2}) - (Y_{C(3)\Sigma} + \lambda Y_{Cmp})(a + a^2 \dot{\epsilon}_{U2})]}{(Y_{\Sigma} + \lambda Y_{\Sigma mp} + \frac{1}{R_{II}})(Y_{\Sigma} + \lambda Y_{\Sigma mp})}, \quad (6)$$

где $Y_{A(3)\Sigma} = \sum_{k=1}^M (1/R_{Ak} + j\omega C_{Ak}) = g_{A\Sigma} + j\omega C_{A\Sigma}$, $Y_{B(3)\Sigma} = \sum_{k=1}^M (1/R_{Bk} + j\omega C_{Bk}) = g_{B\Sigma} + j\omega C_{B\Sigma}$,

$Y_{C(3)\Sigma} = \sum_{k=1}^M (1/R_{Ck} + j\omega C_{Ck}) = g_{C\Sigma} + j\omega C_{C\Sigma}$ – результирующие проводимости фаз на землю всех

M линий распределительной сети соответственно фазы A, B и C ; $Y_{\Sigma(3)}$ – суммарная проводимость сети; R_{II} – переходное сопротивление в месте замыкания на землю; Y_{Bmp}, Y_{Cmp} – проводимости фаз B и C первичной обмотки трансформатора присоединения (ТрП), через который осуществляется подключение ДГР; $Y_{\Sigma mp} = Y_{Amp} + Y_{Bmp} + Y_{Cmp}$ – суммарная проводимость фаз первичной обмотки ТрП; λ – безразмерная комплексная величина, введенная для упрощения записи расчетных выражений и учитывающая параметры ДГР и ТрП и определяемая:

$$\lambda = \frac{\frac{\omega C_{\Sigma}(100-v)}{R_p^2 \omega^2 C_{\Sigma}^2 (100-v)^2 + 100^2} [\omega C_{\Sigma}(100-v) + Y_{\Sigma mp} (R_p \omega C_{\Sigma}(100-v) - 100j)]}{(Y_{\Sigma mp} + \frac{R_p \omega^2 C_{\Sigma}^2 (100-v)^2}{R_p^2 \omega^2 C_{\Sigma}^2 (100-v)^2 + 100^2})^2 + (\frac{100 \omega C_{\Sigma}(100-v)}{R_p^2 \omega^2 C_{\Sigma}^2 (100-v)^2 + 100^2})^2}, \quad (7)$$

где R_p – сопротивление реактора; $v(\%) = (I_{C\Sigma} - I_p)/I_{C\Sigma} \cdot 100\%$ – степень расстройки компенсации; $I_{C\Sigma}$ – емкостной ток ОЗЗ сети; I_p – ток реактора.

Выражение для комплекса тока ОЗЗ (при замыкании фазы A):

$$\dot{I}_3^{(1)} = \frac{\frac{1}{R_{II}} [(Y_{B(3)\Sigma} + \lambda Y_{Bmp}) \dot{U}_{AB} - (Y_{C(3)\Sigma} + \lambda Y_{Cmp}) \dot{U}_{CA}]}{Y_{\Sigma(3)} + \lambda Y_{mp\Sigma} + \frac{1}{R_{II}}}. \quad (8)$$

Чувствительность защиты для варианта работы с относительным принципом сравнения приращений мощности оценивалась величиной:

$$K_{\phi} = \frac{\Delta P_{\alpha \min}}{\Delta P_{\beta \max}} = \left| \frac{m_{\alpha} (\dot{\sigma}_{\alpha} + \dot{\epsilon}_{U2} \sigma_{\alpha}^*)}{m_{\beta} (\dot{\sigma}_{\beta} + \dot{\epsilon}_{U2} \sigma_{\beta}^*)} + \frac{Y_{\Sigma} + \lambda Y_{\Sigma mp}}{(d+j) \dot{\sigma}_{\beta} m_{\beta} C_{\Sigma} \omega} \right| \geq 1,25. \quad (9)$$

где $\Delta P_{\alpha \min}$ – минимальное значение приращения пульсирующей мощности на поврежденной линии α ; $\Delta P_{\beta \max}$ – наибольшее значение приращения пульсирующей мощности на любой из неповрежденных линий β с учетом отрицательного влияния факторов, увеличивающих значения сигналов помех для защиты.

На рисунке 2 приведены результаты расчетов, выполненных согласно (9), позволяющих сделать оценку условий устойчивости функционирования защиты от ОЗЗ в зависимости от асимметрии собственных проводимостей фаз k -ой линий на землю и показателя доли емкостей фаз относительно земли k -ой линий.

Для оценки устойчивости функционирования защиты варьировались: модуль показателя асимметрии проводимостей фаз линий на землю в пределах от 0 до 0,12; показатели доли емкостей фаз относительно земли защищаемых линий в суммарной емкости сети от 0,05 до 0,5. Также принимались следующие условия: источник питания является симметричным, линейное напряжение сети U_n составляет 6,3 кВ; ДГР имеет резонансную настройку; коэффициент демпфирования сети (относительная активная проводимость сети) принят равным минимальному значению, а именно 0,02; активная проводимость ДГР равна 1% от реактивной проводимости реактора; в качестве ТрП был взят трансформатор ТМ-630/6.

Полученные результаты (рисунок 2) позволяют определить границы устойчивости функционирования защиты от ОЗЗ: модули показателей асимметрии собственных проводимостей поврежденной и неповрежденной линий σ_k , при которых защита будет селективно работать независимо от количества защищаемых линий и степени расстройки компенсации, должны быть не более 0,034. При значениях $\sigma_k \leq 0,0075$, регламентируемых ПУЭ, защита будет однозначно определять поврежденную линию. Кроме того, это означает, что для сетей, содержащих только кабельные линии, что в большинстве случаев характерно для сетей с компенсированной нейтралью, защита от ОЗЗ безусловно будет работать селективно. В других случаях защита от ОЗЗ может оказаться на границе устойчивости функционирования.

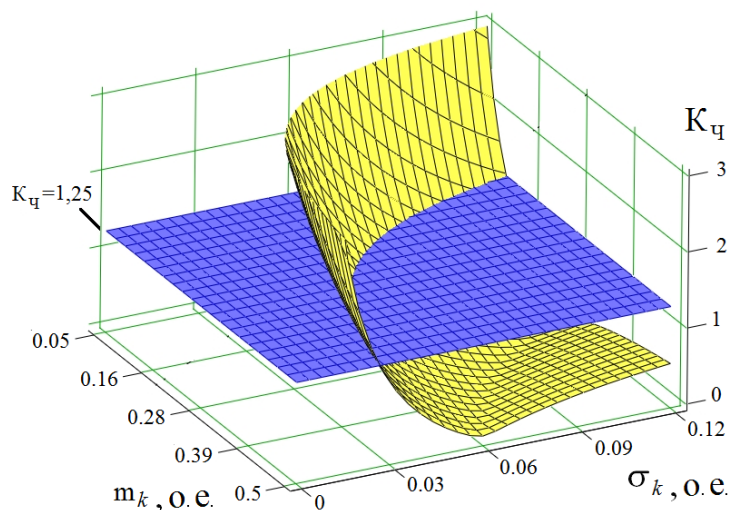


Рисунок 2 - Зависимость K_q от σ_k и m_k

На рисунке 3 представлены результаты расчетов для оценки дополнительного влияния возможной несимметрии линейных напряжений источника питания на коэффициент чувствительности защиты компенсированной сети, содержащей только кабельные линии.

Установлено, что нормируемое ГОСТ наибольшее значение модуля $\varepsilon_{U_2} = 0,04$ может максимально увеличивать/уменьшать K_q лишь на 9%. Аналогичные расчеты были проведены для компенсированной сети, содержащей преимущественно воздушные линии. При этом минимальное значение коэффициента чувствительности составило лишь $K_q = 0,0142$.

Таким образом, новая защита от ОЗЗ будет безусловно достоверно определять поврежденную линию среди других линий компенсированной сети, содержащих только кабельные линии.

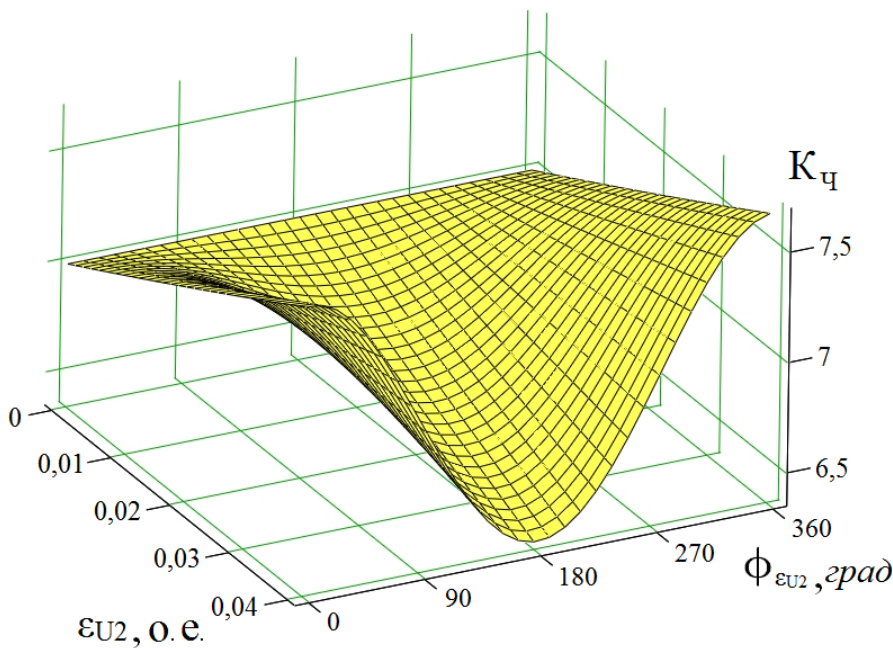


Рисунок 3 - Зависимость $K_{\text{ч}}$ от ε_{U_2} и $\varphi_{\varepsilon_{U_2}}$ для компенсированной сети, содержащей только кабельные линии

При наиболее неблагоприятных условиях: (сеть содержит преимущественно воздушные линии; резонансная настройка компенсации; $d_{\Sigma} = 0,02$; $\varepsilon_{U_2} = 0,04$; $\varphi_{\varepsilon_{U_2}} = 90^{\circ}$; $\sigma_k = 0,12$; $\varphi_{\sigma_k} = 274^{\circ}$; активная проводимость ДГР равна 1% от реактивной проводимости реактора; $m_{\alpha} = 0,25$; $m_{\beta} = 0,5$) защита от ОЗЗ, основанная на контроле пульсирующей мощности, не будет характеризоваться устойчивостью функционирования, т.е. не сможет обеспечивать достоверное определение поврежденной линии.

По результатам исследований, выполненных в второй главе, сделаны следующие выводы:

- в случае, если на неповрежденных линиях проводимости трех фаз на землю симметричны, то контролируемые защитой приращения мощности на каждой из этих линий будут равны нулю, что будет соответствовать условию абсолютной селективности защиты;
- защита будет устойчиво функционировать независимо от количества защищаемых линий и степени расстройки компенсации при модулях показателей асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю не более 0,034;
- защита будет безусловно достоверно определять поврежденную линию среди других линий компенсированной сети, содержащей только кабельные линии;
- при определенных соотношениях модулей показателя асимметрии собственных проводимостей фаз (собственных емкостных токах на землю) поврежденной и неповрежденной линий, а именно при $m_k \geq 0,12$, защита от ОЗЗ может оказаться на границе устойчивости функционирования.

В третьей главе приведены результаты оценки способов обеспечения устойчивости функционирования защиты от ОЗЗ при возможных наиболее неблагоприятных факторах для работы защиты. Рассмотрены способы: преднамеренная расстройка компенсации; учет наличия несинусоидальности (высших гармоник) токов и напряжений сети; комбинированное заземление нейтрали.

«Полезный сигнал» защиты можно повысить путем увеличения остаточного тока ОЗЗ. Для этого может быть применена преднамеренная расстройка компенсации. Согласно ПТЭЭП степень расстройки компенсации не должна превышать $\pm 5\%$ для сетей 6-20 кВ, чтобы реактивная составляющая тока ОЗЗ не превышала 5 А, и $\pm 10\%$ для сетей 35 кВ (при емко-

стном токе менее 15 А). В реальных условиях степень расстройки компенсации может достигать существенно больших значений, вплоть до 30% и более.

По результатам расчетов установлено, что преднамеренная расстройка компенсации более 7,7% обеспечит значения $K_{\text{ч}} > 1,25$, т.е. достоверное определение поврежденной линии при ОЗЗ даже при принятых в расчетах наиболее неблагоприятных условиях для работы защиты.

Также были проведены расчеты величины минимального значения степени расстройки компенсации v_{min} , необходимой для обеспечения устойчивости функционирования защиты (минимального значения коэффициента чувствительности), с учетом совокупного влияния двух факторов: асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю и несимметрии линейных напряжений источника питания (рисунок 4,а), а также с учетом значений показателей доли емкостей фаз относительно земли поврежденной и неповрежденной линий (рисунок 4,б).

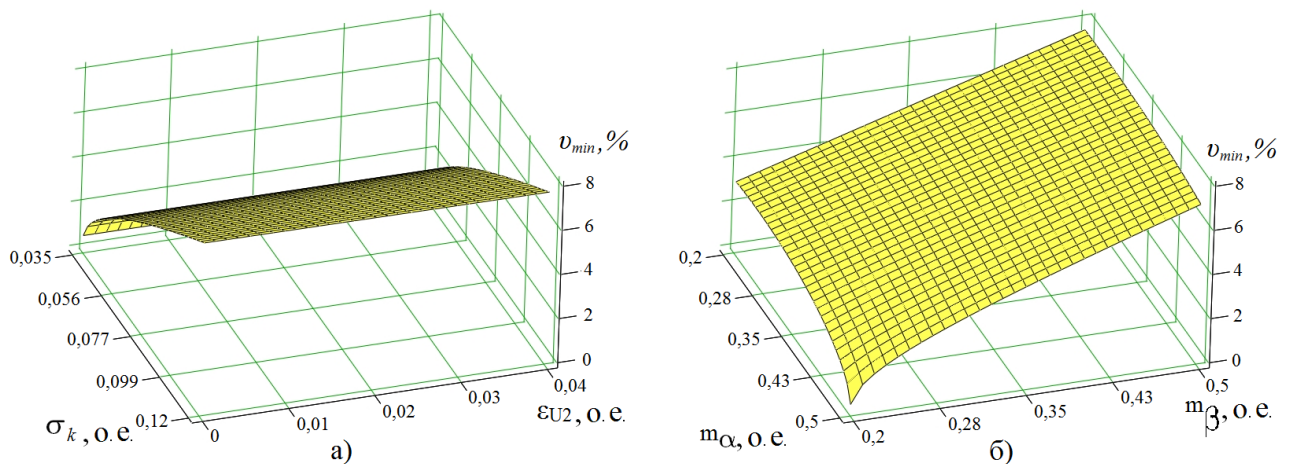


Рисунок 4 - Зависимости v_{min} от:

а) – σ_k и ϵ_{U2} ; б) – m_α и m_β

На основании полученных зависимостей (рисунок 4,а) и (рисунок 4,б) можно определить величину минимального значения степени расстройки компенсации, необходимую для обеспечения устойчивости функционирования защиты, для конкретной компенсированной сети при известных σ_k и ϵ_{U2} или m_α и m_β .

Высшие гармоники (ВГ) напряжений и токов обуславливают дополнительные переменные составляющие в мгновенной мощности линий сети. С учетом ВГ контролируемым сигналом защиты от ОЗЗ будет суммарная переменная составляющая мгновенной мощности.

Выражения для приращений комплексных значений мощностей с учетом ВГ получены в виде:

– для поврежденной линии (индекс α):

$$\Delta \dot{S}_{\Pi \alpha \mu \nu} = \dot{U}_{\Pi \mu} \Delta \dot{U}_{\Phi(3)\nu} (Y_{A\alpha\nu} + a^{2\mu} Y_{B\alpha\nu} + a^\mu Y_{C\alpha\nu}) + \dot{U}_{\Pi \mu} \dot{I}_{3\nu}^{(1)}, \quad (10)$$

– для любой неповрежденной линии (индекс β):

$$\Delta \dot{S}_{\Pi \beta \mu \nu} = \dot{U}_{\Pi \mu} \Delta \dot{U}_{\Phi(3)\nu} (Y_{A\beta\nu} + a^{2\mu} Y_{B\beta\nu} + a^\mu Y_{C\beta\nu}), \quad (11)$$

где $\dot{U}_{\Pi \mu}$ – комплекс μ -ой гармоники линейного напряжения сети; $\Delta U_{\Phi(3)\nu}$, $\Delta U_{\Phi(3)\nu}^*$ – комплекс и сопряженный комплекс изменения ν -ой гармоники фазных напряжений относи-

тельно земли при ОЗЗ в сети; $Y_{A\alpha\nu}, Y_{B\alpha\nu}, Y_{C\alpha\nu}, Y_{A\beta\nu}, Y_{B\beta\nu}, Y_{C\beta\nu}, Y_{A\alpha\nu}^*, Y_{B\alpha\nu}^*, Y_{C\alpha\nu}^*, Y_{A\beta\nu}^*, Y_{B\beta\nu}^*, Y_{C\beta\nu}^*$ – комплексные и сопряженные комплексные проводимости фаз на землю соответственно поврежденной и неповрежденной линий для ν -ой гармоники тока; $I_{3\nu}^{(1)}, I_{3\nu}^{*(1)}$ – комплекс и сопряженный комплекс ν -ой гармоники тока ОЗЗ.

Комплекс ν -ой гармоники тока замыкания на землю (при замыкании фазы A) в компенсированной сети определяется согласно выражению:

$$\dot{I}_{3\nu}^{(1)} = \frac{\frac{1}{R_{\Pi}}[(Y_{B(3)\Sigma\nu} + \lambda_{\nu} Y_{Bmp\nu})\dot{U}_{AB\nu} - (Y_{C(3)\Sigma\nu} + \lambda_{\nu} Y_{Cmp\nu})\dot{U}_{CA\nu}]}{Y_{\Sigma(3)\nu} + \lambda_{\nu} Y_{mp\Sigma\nu} + \frac{1}{R_{\Pi}}}, \quad (12)$$

где $\lambda_{\nu} = Y_{P\nu} / (Y_{P\nu} + Y_{\Sigma mp\nu})$ – безразмерная комплексная величина ν -ой гармоники, введенная для упрощения записи расчетных выражений аналогично (7); $Y_{Bmp\nu}, Y_{Cmp\nu}$ – комплексы ν -ой гармоники проводимости фаз первичной обмотки ТрП соответственно фазы B и C ; $Y_{\Sigma mp\nu} = Y_{Amp\nu} + Y_{Bmp\nu} + Y_{Cmp\nu}$ – комплекс ν -ой гармоники суммарной проводимости фаз первичной обмотки ТрП; $Y_{P\nu}$ – комплекс ν -ой гармоники проводимости ДГР, который определяется согласно выражению:

$$Y_{P\nu} = \frac{R_p}{R_p^2 + (X_p / K_{P\nu})^2} - j \frac{X_p / K_{P\nu}}{R_p^2 + (X_p / K_{P\nu})^2}, \quad (13)$$

где $K_{P\nu}$ – коэффициент ν -ой гармонической составляющей тока ДГР, который зависит от нелинейности реактора.

Комплексная величина λ_{ν} зависит от ν -х гармонических составляющих параметров ДГР и ТрП для конкретной ν -ой гармоники. Однако при отсутствии ν -ой гармонической составляющей тока ДГР (или малом ее значении) при $\nu > 1$, т.е. при $K_{P\nu} \approx 0$ можно считать, что сеть является некомпенсированной для ν -ой гармонической составляющей и $\lambda_{\nu} = 0$. В связи с этим согласно (13) можно записать:

$$\lambda_{\nu} = \begin{cases} \frac{\frac{K_{P\nu} \omega C_{\Sigma} (100 - \nu)}{R_p^2 K_{P\nu}^2 \omega^2 C_{\Sigma}^2 (100 - \nu)^2 + 100^2} [K_{P\nu} \omega C_{\Sigma} (100 - \nu) + (Y_{\Sigma mp\nu} + \frac{R_p K_{P\nu}^2 \omega^2 C_{\Sigma}^2 (100 - \nu)^2}{R_p^2 K_{P\nu}^2 \omega^2 C_{\Sigma}^2 (100 - \nu)^2 + 100^2})^2 + (\frac{100 K_{P\nu} \omega C_{\Sigma} (100 - \nu)}{R_p^2 K_{P\nu}^2 \omega^2 C_{\Sigma}^2 (100 - \nu)^2 + 100^2})^2]}{+ Y_{\Sigma mp\nu} (R_p K_{P\nu} \omega C_{\Sigma} (100 - \nu) - 100 j)} & \text{при } K_{P\nu} \neq 0; \\ 0 & \text{при } K_{P\nu} = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Комплекс ν -ой гармоники изменения напряжений фаз относительно земли:

$$\Delta \dot{U}_{\Phi(3)\nu} = \dot{U}_{A(3)\nu}^{(1)} - \dot{U}_{A(3)\nu} = \frac{\frac{1}{R_{\Pi}}[(Y_{B(3)\Sigma\nu} + \lambda_{\nu} Y_{Bmp\nu})\dot{U}_{AB\nu} - (Y_{C(3)\Sigma\nu} + \lambda_{\nu} Y_{Cmp\nu})\dot{U}_{CA\nu}]}{(Y_{\Sigma(3)\nu} + \lambda_{\nu} Y_{\Sigma mp\nu} + \frac{1}{R_{\Pi}})(Y_{\Sigma(3)\nu} + \lambda_{\nu} Y_{\Sigma mp\nu})}. \quad (15)$$

С целью количественной оценки влияния ВГ токов и напряжений сети на устойчивость функционирования защиты коэффициент чувствительности рассматривался в виде отношения среднеквадратичных (действующих) значений $\Delta p_{-\alpha}$ к $\Delta p_{-\beta}$.

На основании выражений (10)-(15) были проведены расчеты и построены зависимости $K_{\text{ч}}$ от совокупного влияния μ -х гармоник линейных напряжений источника питания и ν -х гармоник тока ДГР (рисунок 5) при наиболее неблагоприятных факторах.

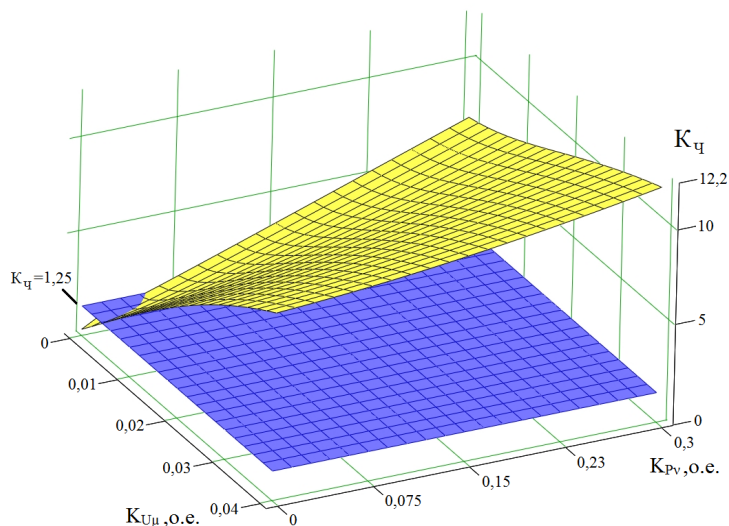


Рисунок 5 - Зависимости $K_{\text{ч}}$ от K_U и K_P

Полученные результаты (рисунок 5) свидетельствуют о том, что с ростом совокупной доли ВГ токов и напряжений сети повышается коэффициент чувствительности защиты: при содержании гармоник в линейных напряжениях источника питания на уровне согласно ГОСТ Р 51317.4.30 - 2008 $K_{\text{ч}}$ увеличивается вплоть до значения 9,6; при наличии дополнительно гармонических составляющих в токе реактора (с уровнем 16; 3 и 2,3% для 3-й, 5-й и 7-й гармоник соответственно) $K_{\text{ч}}$ увеличивается до значения 12,1.

Стоит отметить, что отдельно 5-я и 7-я гармоники в токе реактора незначительно уменьшают коэффициент чувствительности защиты, однако основное влияние оказывает 3-я гармоническая составляющая, амплитуда которой имеет наибольшее значение для всех типов ДГР и может достигать 0,3 от основной гармоники тока реактора.

Использование в алгоритме работы исполнительного органа устройства защиты квадратов действующих значений при учете ВГ будет весьма целесообразно, так как при этом $K_{\text{ч}}$ увеличивается в ~11-12 раз по сравнению с использованием среднеквадратичных величин. Так, при $K_{U5} = 0,04$, $K_{U7} = 0,03$, $K_{U11} = 0,02$, $K_{U13} = 0,02$, $K_{P3} = 0,3$, $K_{P5} = 0,056$ и $K_{P3} = 0,043$ величина $K_{\text{ч}}$ с использованием квадратов действующих значений будет составлять ~147.

На основании полученных результатов оценки влияния высших гармоник на функционирование защиты можно утверждать, что учет ВГ будет обеспечивать весьма высокую чувствительность и селективность работы защиты даже при наиболее неблагоприятных условиях.

Проведенные исследования влияния преднамеренной расстройки компенсации и высших гармоник токов и напряжений сети на контролируемые сигналы защиты показали, что такими решениями можно обеспечить устойчивое функционирование защиты от ОЗЗ даже при наиболее неблагоприятных условиях. Однако преднамеренная расстройка нежелательна, а гармонический состав токов и напряжений величин не является стабильным даже для конкретной сети.

Поэтому в диссертационном исследовании рассматривался также вариант повышения чувствительности защиты путем увеличения остаточного тока ОЗЗ в компенсированной сети за счет увеличения активной проводимости элемента заземления нейтрали. Для этого может

быть использован высокоомный резистор с проводимостью $g_N = 1/R_N$, который подключают параллельно ДГР, т.е. применяют комбинированное заземление нейтрали (рисунок б).

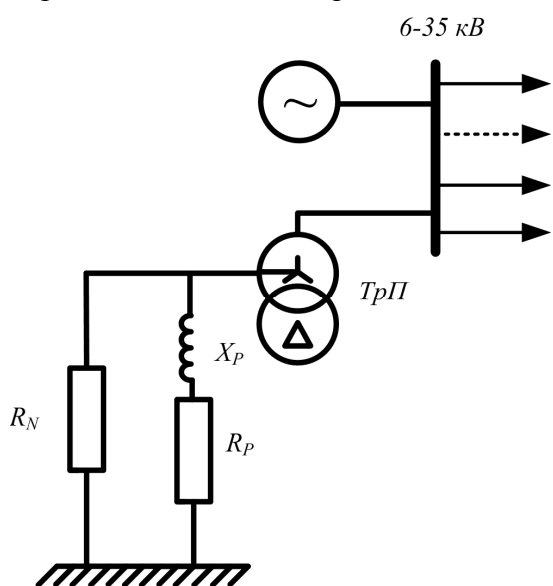


Рисунок б - Схема элемента комбинированного заземления нейтрали

Величину сопротивления резистора R_N в общем случае рекомендуется выбирать исходя из следующих известных условий: ограничение перенапряжений в сети при дуговых замыканиях на землю; гарантия селективной работы токовой защиты от ОЗЗ; исключение существования ферро-резонансных процессов, обусловленных насыщением магнитопровода трансформаторов напряжения; обеспечение электробезопасности; улучшение режима работы сетей с трудно устранимой несимметрией фазных напряжений сети.

Комбинированное заземление нейтрали в проведенных расчетах учитывалось соответствующим значением комплексной безразмерной величины $\lambda_{комб}$ (аналогично (7)).

Задача оценки влияния величины сопротивления резистора, необходимой для обеспечения гарантированной устойчивости функционирования защиты от ОЗЗ сводилась к отысканию таких значений проводимостей $g_N = 1/R_N$ (т.е. значений R_N), при которых коэффициент чувствительности имел бы значения не менее $K_{\text{ч}} \geq 1,25$ при наиболее неблагоприятных факторах. При этом варьировался модуль показателя асимметрии проводимостей фаз линий на землю в пределах от 0 до 0,12; варьировалась величина общего емкостного тока ОЗЗ сети от 30 до 100 А, что соответствует реальным условиям работы электрических сетей 6-35 кВ с компенсированной нейтралью. Величина показателя m_k варьировалась от 0,12 до 0,5. Это связано с тем, что при $m_k < 0,12$ защита от ОЗЗ, основанная на контроле пульсирующей мощности, будет обладать достаточной устойчивостью функционирования и без дополнительного применения резистора.

Для удобства выполнения расчетов при обосновании величины сопротивления резистора R_N рассматривался относительный показатель, который характеризовал увеличение активной составляющей тока элемента комбинированного заземления нейтрали, а именно показатель величины тока через резистор по отношению к величине тока реактора $n_N^* = I_N / I_p = Z_p / R_N$.

По результатам расчетов установлено, что n_N^* не зависит от величины емкостного тока ОЗЗ компенсированной сети. Однако учитывалось, что величина Z_p влияет на показатель n_N^* . Следовательно, величину R_N надо подбирать для конкретной сети (каждого I_{CS} , т.е. Z_p). По результатам получены зависимости n_N^* с учетом асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю и величины m_k . На основании анализа результатов расчетов установлено, что выбор резистора для обеспечения устойчивости функционирования новой защиты от ОЗЗ при любых условиях не будет противоречить известным критериям выбора резистора

для комбинированного заземления, так как значения n_N^* , определяющие условие ограничения перенапряжений в сети, больше значений n_N^* для новой защиты.

Например, для принятых в расчетах наиболее неблагоприятных условий и токе ОЗЗ в сети порядка 50 А величина сопротивления резистора для ограничения перенапряжений будет составлять около 480 Ом (т.е. $n_N^* = 0,15$). Для обеспечения селективной работы новой защиты около 730 Ом (т.е. $n_N^* = 0,1$), что не противоречит первому критерию.

Для практических целей разработаны рекомендации по выбору величины резистора для комбинированного заземления нейтрали по условию обеспечения чувствительности и селективной работы защиты.

Условие гарантированного обеспечения функционирования защиты имеет вид:

$$R_N \leq 5,8U_{Л} / I_{СЭ}. \quad (16)$$

Согласно (16) при напряжении сети 6,3 кВ и емкостном токе ОЗЗ, например, 100А величина резистора для обеспечения устойчивости функционирования защиты может быть 365 Ом, а при напряжении сети, например 35 кВ, и той же величине емкостного тока величина сопротивления резистора около 2 кОм.

Выбор резистора в соответствии с разработанными рекомендациями позволит гарантированно обеспечить устойчивое функционирование новой защиты от ОЗЗ в компенсированных сетях 6-35 кВ и не будет противоречить известным критериям выбора резистора для комбинированного заземления нейтрали.

В четвертой главе приведены результаты исследования устойчивости функционирования защиты при перемежающихся замыканиях на землю.

На основании расчетной схемы замещения разработана математическая модель компенсированной сети применительно к режиму перемежающихся замыканий в виде системы дифференциальных уравнений.

Решение этих уравнений позволило определить значения электрических переменных для заданных моментов времени и в результате получить расчетные осциллограммы, характеризующие качество работы защиты. Расчеты были проведены методом приближенного решения с использованием специального компьютерного программного обеспечения, в качестве которого был принят пакет универсальных интегрированных программ «*Matlab*». В частности, при выполнении исследований была использована прикладная подпрограмма «*Simulink*» с реализацией решения систем дифференциальных уравнений методом «Дормана-Принса».

С целью исследований характеристик защиты в режиме перемежающихся замыканий разработана специальная имитационная модель распределительной сети 6-35 кВ с компенсированной нейтралью, а также модель, реализующая алгоритм работы защиты от ОЗЗ.

На рисунке 7 в качестве примера приведены осциллограммы при резонансной настройке реактора и заданной максимальной асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю: фазных напряжений сети; токов поврежденной и неповрежденной линий; напряжения нулевой последовательности; а также осциллограммы мгновенных значений переменных составляющих мощностей на поврежденной и неповрежденной линиях и их приращений (при заданной асимметрии отличие емкостей фаз относительно земли на линиях α и β составляло 20%).

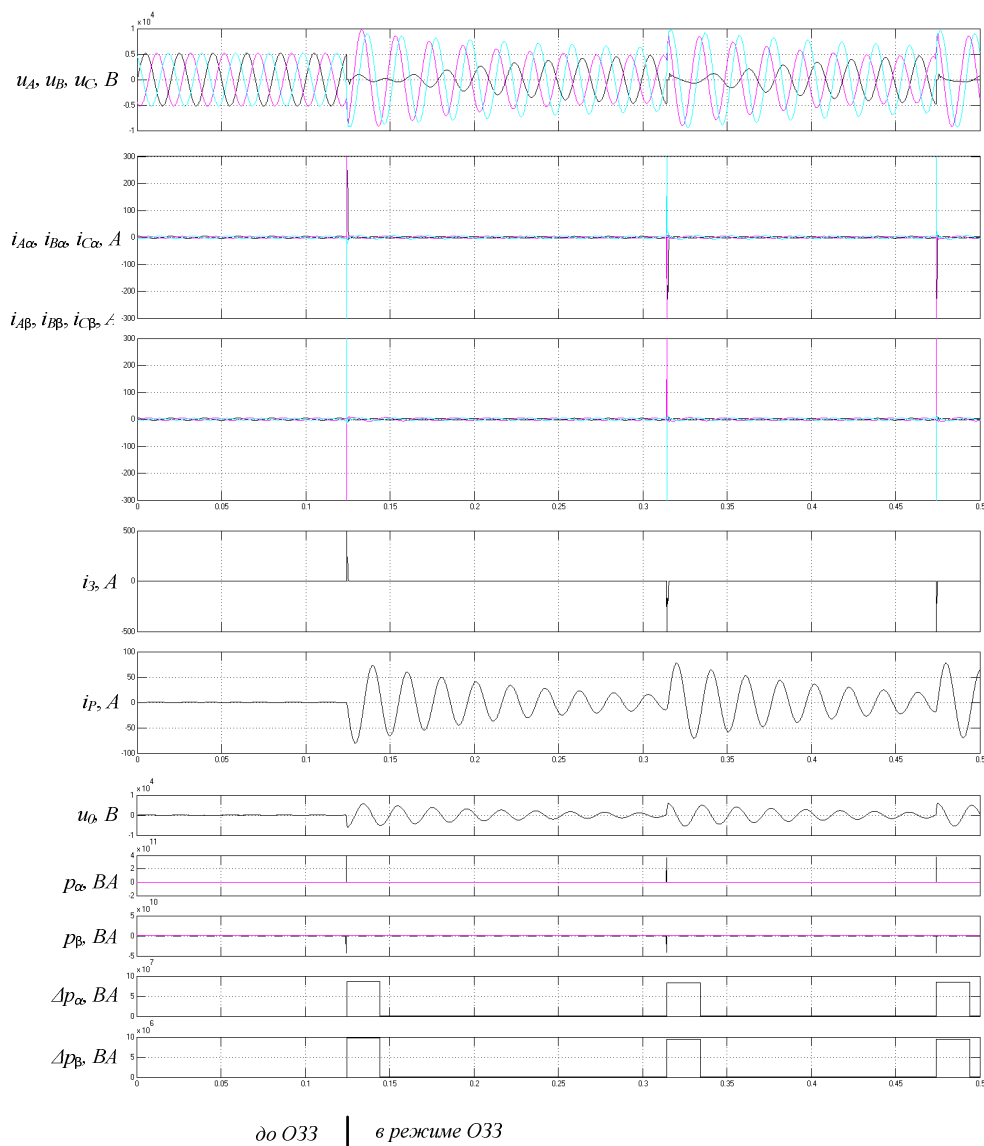


Рисунок 7 - Осциллограммы, характеризующие работу защиты при перемежающемся замыкании в сети с компенсированной нейтралью при максимальной асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю и горении/зажигании дуги согласно теории Петерсена

Осциллограммы (рисунок 7) свидетельствуют о вполне достаточной для селективной работы защиты величине разницы контролируемых сигналов на поврежденной и неповрежденной линиях даже при маловероятной асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю (кратность сигналов составляет ≈ 9 раз).

Аналогичные исследования были проведены с варьируемыми расстройкой компенсации и несимметрией напряжений источника питания по условиям теорий Петерсена и Дж. Петерса и Х. Слепяна.

Результаты проведенных исследований, описанных в четвертой главе, позволили сделать следующие выводы:

– устойчивость функционирования новой защиты от ОЗЗ в компенсированной сети при перемежающихся ОЗЗ будет в большой степени зависеть от учета влияния на работу защиты бросков емкостного тока ОЗЗ, которые на поврежденной линии всегда имеют наибольшую величину;

– величины бросков контролируемых защитой переменных составляющих мгновенных мощностей на поврежденной линии всегда больше, чем на неповрежденных линиях, а отношения приращений мощностей будут достаточны для надежного и селективного срабатывания быстродействующей защиты от ОЗЗ.

В пятой главе приведены результаты исследований характеристик разработанного опытного образца устройства защиты от ОЗЗ на физической модели компенсированной сети.

В устройстве защиты применены контроллер реального времени *CompactRIO 9075*, модули аналогового ввода *NI 9215* и *NI 9205*, модуль цифрового вывода *NI 9476*. Особенностью данного контроллера является возможность построения информационно-измерительной системы реального времени на базе ПЛИС (*FPGA Xilinx Spartan-6 LX25*), которая значительно увеличивает быстродействие защиты за счет детерминированного во времени исполнения алгоритма, а также комплексной обработки и анализа данных в реальном времени. Необходимость использования системы реального времени вызвана пожеланиями самого автора обеспечить высокие требования по быстродействию работы защиты.

С целью проведения экспериментальных исследований работы опытного образца устройства защиты также была разработана и смонтирована лабораторная физическая модель компенсированной сети.

Модель содержала: трехфазный источник питания напряжением 380 В; шины распреустройства с группой отходящих присоединений, включая поврежденную линию α , неповрежденную линию β . Еще одной линией моделировались все остальные неповрежденные линии сети и она представляла собой эквивалентную линию с учетом параметров других $M-2$ линий сети; нагрузки поврежденной линии α и неповрежденной линии β ; ДГР для компенсации емкостных токов замыкания на землю; трансформатор присоединения, обмотки которого соединены по схеме « Y_0/Δ »; измерительный трансформатор линейных напряжений сети и напряжения нулевой последовательности; трансформаторы тока, установленные на фазах A , B и C на поврежденной линии α и неповрежденной линии β ; трансформаторы тока для контроля тока ДГР и тока ОЗЗ сети; выключатели для коммутации защищаемых линий; ключ для создания ОЗЗ и коммутационный аппарат для подключения/отключения ДГР.

На рисунке 8 в качестве примера приведены осциллограммы, характеризующие работу защиты в сети с компенсированной нейтралью при несимметричных нагрузках линий α и β : напряжение нулевой последовательности – u_0 ; остаточный ток ОЗЗ – i_3 ; ток реактора – i_P ; переменные составляющие суммарных мгновенных мощностей поврежденной – $p_{\Pi\alpha}$ и неповрежденной линий – $p_{\Pi\beta}$; приращения вычисляемых квадратов действующих значений переменных составляющих суммарных мощностей поврежденной – $\Delta p_{\Pi\kappa\alpha}$ и неповрежденной – $\Delta p_{\Pi\kappa\beta}$ линий (контролируемые сигналы), а также логический сигнал о срабатывании исполнительного органа защиты для поврежденной линий. Опытный образец устройства защиты был настроен для срабатывания «На сигнал».

Эти осциллограммы (рисунок 8) свидетельствуют о том, что при несимметричных нагрузках линий и наличии асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю переменные составляющие суммарных мгновенных мощностей на поврежденной линии α и на неповрежденной линии β были соизмеримы до и в режиме ОЗЗ. Эти факторы являются усугубляющими нежелательными условиями для работы защиты. Однако даже при таких условиях, как показали результаты исследований, коэффициент чувствительности защиты со-

ставлял ≈ 5 , т.е. защита была способна надежно фиксировать поврежденную линию, о чем свидетельствует осциллограмма сигнала о срабатывании исполнительного органа.

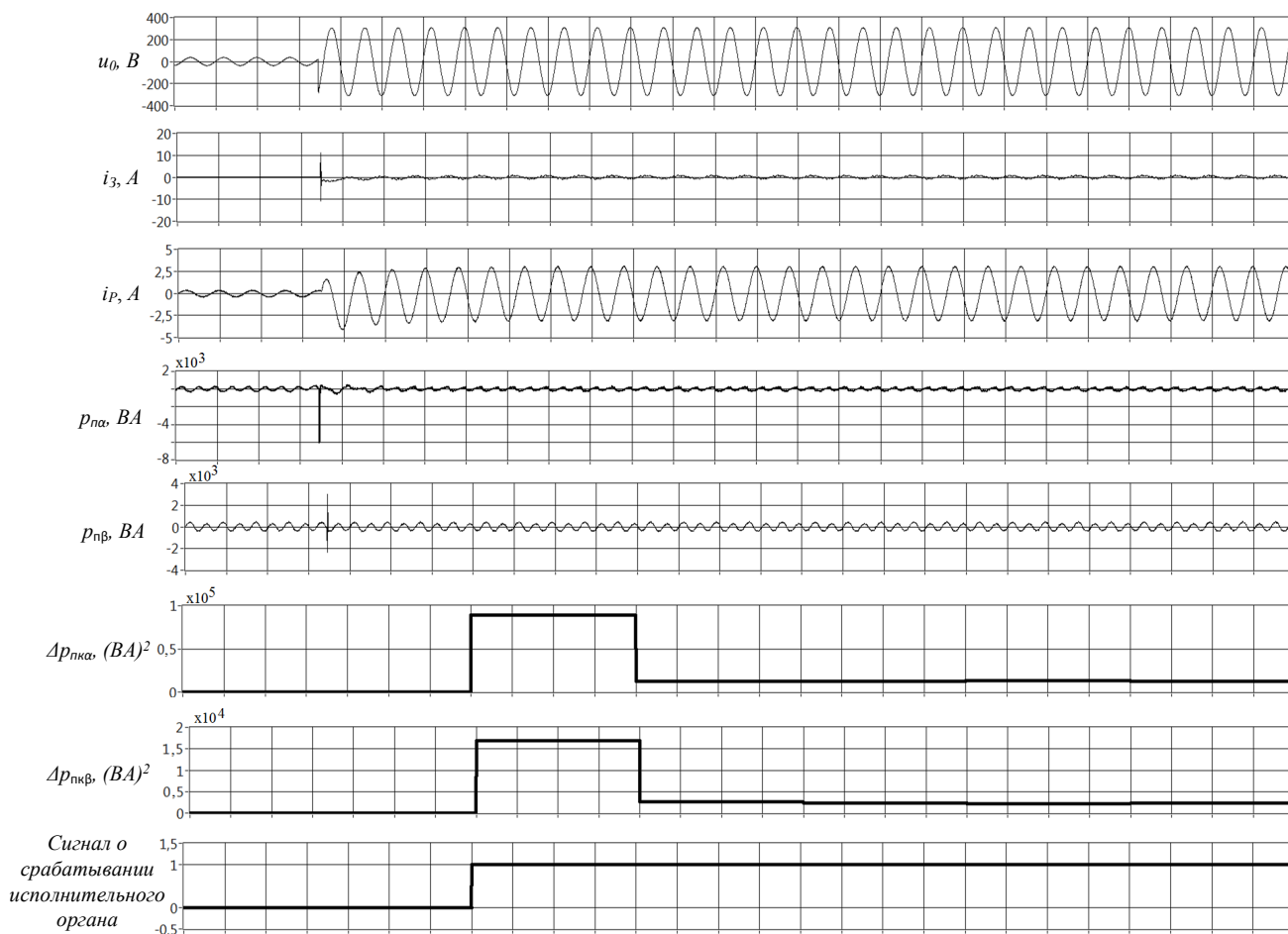


Рисунок 8 - Осциллограммы, характеризующие работу защиты в сети с компенсированной нейтралью при несимметричных нагрузках линий α и β

Ряд проведенных экспериментов показал, что при устойчивых замыканиях на землю коэффициент чувствительности защиты составлял $5 \div 75$ в зависимости от разных условий (несимметрии нагрузок линий, асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю, расстройки компенсации ДГР); при перемежающихся замыканиях – $4 \div 25$. Таким образом, устройство защиты от ОЗЗ успешно реагировало как на устойчивые, так и на перемежающиеся замыкания.

В ходе исследований интерфейс программы устройства был специально модифицирован. В результате таких изменений установлено, что защита от ОЗЗ может обеспечить два режима работы:

- нормальный режим;
- режим диагностики состояния линий.

В нормальном режиме работы устройства сигнал о появлении ОЗЗ на одной из линий сети формируется только по истечении заданного времени. Такое решение позволяет отстраиваться от коротковременных случайных замыканий.

В режиме диагностики состояния линий выдержка времени для исполнительного органа не устанавливается, но осуществляется регистрация событий в виде «клевков».

Результаты проведенных экспериментальных исследований качества работы разработанного опытного образца защиты от ОЗЗ свидетельствуют об устойчивости функционирования защиты при различных условиях работы. Даже при соизмеримых переменных состав-

ляющих мгновенных мощностей защищаемых линий сети в нормальном режиме и наличии асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю, благодаря достигнутому высокому быстродействию, защита способна обеспечить селективное выявление поврежденной линии из группы защищаемых линий секции шин.

По результатам исследований, описанных в пятой главе, сделаны следующие выводы:

– результаты проведенных экспериментальных исследований рабочих характеристик опытного микропроцессорного образца устройства защиты от ОЗЗ подтвердили теоретические выводы о возможности устойчивого функционирования новой защиты в компенсированных сетях 6-35 кВ;

– использование в алгоритме функционирования исполнительного органа устройства защиты для определения контролируемых защитой приращений мощностей разности квадратов переменных составляющих мгновенных мощностей линий обеспечивает значительное повышение чувствительности и эффективности защиты;

– по результатам экспериментальных исследований установлено, что микропроцессорное устройство новой защиты путем соответствующего программирования может обеспечить высокое быстродействие и эффективный контроль как устойчивых, так и перемежающихся ОЗЗ и, при необходимости, может быть настроено на режим контроля «клевков» и диагностики состояния изоляции линий относительно земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные научно-практические результаты:

1) теоретически обоснована возможность успешного применения новой защиты от ОЗЗ в сетях 6-35 кВ с компенсированной нейтралью;

2) исследовано влияние на устойчивость функционирования защиты от ОЗЗ различных возможных неблагоприятных для ее работы факторов, таких как: асимметрия собственных проводимостей фаз линий на землю, несимметрия напряжений источника питания, конфигурация сети (большие значения показателей доли емкостей фаз линий в суммарной емкости сети);

3) проведена оценка влияния степени расстройки компенсации и высших гармоник токов и напряжений на устойчивость функционирования защиты;

4) разработаны рекомендации по выбору величины сопротивления резистора для комбинированного заземления нейтрали, необходимой для гарантированного обеспечения устойчивости функционирования защиты от ОЗЗ;

5) теоретически и путем моделирования обоснована возможная работоспособность новой защиты от ОЗЗ при перемежающихся ОЗЗ;

6) разработан опытный образец микропроцессорного устройства защиты от ОЗЗ, экспериментально доказана высокая эффективность работы новой защиты в компенсированной сети как при устойчивых, так и при перемежающихся замыканиях на землю.

Перспектива дальнейшей разработки темы:

1) исследование влияния на устойчивость функционирования защиты других факторов: погрешностей измерительных трансформаторов тока и напряжения, величины и характера переходного сопротивления в месте замыкания на землю;

2) проведение промышленных испытаний разработанного устройства защиты в действующей распределительной сети 6-35 кВ с компенсированной нейтралью.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Костарев И.А. Об эффективности защиты распределительных сетей 6-10 кВ от однофазных замыканий, основанной на контроле пульсирующей мощности / М.Л. Сапунков, А.А. Худяков, И.А. Костарев // Горное оборудование и электромеханика. 2012. – №11. – С. 15-18 (0,7 п.л. / 0,4 п.л.).
2. Костарев И.А. Исследование и оценка возможности применения защиты от однофазных замыканий, основанной на контроле пульсирующей мощности, в компенсированных сетях горных предприятий / М.Л. Сапунков, А.А. Худяков, И.А. Костарев // Горное оборудование и электромеханика. 2012. – №11. – С. 8-14 (1,2 п.л. / 0,9 п.л.).
3. Костарев И.А. Оценка влияния несинусоидальности тока компенсирующего реактора на устойчивость функционирования защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ нефтеперерабатывающих предприятий / М.Л. Сапунков, И.А. Костарев // Нефтяное хозяйство. 2013. – №6. – С. 126-128 (0,75 п.л. / 0,5 п.л.).
4. Костарев И.А. Разработка и испытания опытного образца устройства защиты сетей 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю / М.Л. Сапунков, И.А. Костарев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. – №2. – С. 334-339 (0,56 п.л. / 0,4 п.л.).

Патенты:

5. Пат. 2535298 Российская Федерация: МПК7 Н 02 Н 3/16. Способ определения поврежденной линии в компенсированной трехфазной сети / М.Л. Сапунков, И.А. Костарев, В.А. Якимова; патентообладатель Перм. нац. исслед. политех. ун-т. № 2013127487/07; заявл. 17.06.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. №. 34.
6. Пат. 2538767 Российская Федерация: МПК7 Н 02 Н 3/16. Устройство общесекционной защиты трехфазной сети от однофазных замыканий на землю / Сапунков М.Л., Сапунков Л.М., Костарев И.А.; патентообладатель Перм. нац. исслед. политех. ун-т. № 2013135376/07; заявл. 26.07.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. №. 1.

Научные публикации в других изданиях

7. Костарев И.А. О возможности применения новой защиты от однофазных замыканий в распределительных сетях с компенсацией емкостных токов / М.Л. Сапунков, А.А. Худяков, И.А. Костарев // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы V Всерос. науч.-техн. конф.; Пермь, 1-30 нояб. 2012 г. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012. – С. 28-35. (0,5 п.л. / 0,4 п.л.).
8. Костарев И.А. О возможности применения защиты от однофазных замыканий, основанной на контроле пульсирующей мощности, в сети с компенсируемой нейтралью / М.Л. Сапунков, И.А. Костарев // Тинчуринские чтения: материалы докл. VII междунар. мол. науч. конф.: Казань, 25-27 апреля 2012г. – Казань, 2012. – Т.1. – С. 67-68 (0,16 п.л. / 0,1 п.л.).
9. Костарев И.А. Новая селективная защита от однофазных замыканий на землю / М.Л. Сапунков, А.А. Худяков, И.А. Костарев // Энергосбережение, энергопотребление, энергоэффективность, энергосбережение. Возобновляемые источники энергии: междунар. науч.-практ. конф.: тез. докл. – Пермь, 2012. – С. 66-69 (0,19 п.л. / 0,14 п.л.).
10. Костарев И.А. Исследование влияния переходного сопротивления на характеристики защиты от однофазных замыканий, основанной на контроле пульсирующей мощности / М.Л. Сапунков, А.А. Худяков, И.А. Костарев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2012. №4. – С. 111-117 (0,6 п.л. / 0,4 п.л.).

11. Костарев И.А. К вопросу о селективных защитах от однофазных замыканий на землю в сетях с компенсированной нейтралью / И.А. Худякова, И.А. Костарев // Современные техника и технологии: сб. тр. XVIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и мол. ученых, Томск, 9-13 апр. 2012 г. – Томск, 2012. – Т.1. – С. 129-130 (0,25 п.л. / 0,1 п.л.).
12. Костарев И.А. Влияние асимметрии собственных проводимостей линий на землю на характеристики новой защиты от однофазных замыканий в сетях с компенсированной нейтралью / М.Л. Сапунков, А.А. Худяков, И.А. Костарев // Электроэнергетика глазами молодежи: тр. III Междунар. науч.-техн. конф., г. Екатеринбург, 22-26 октября 2012 г. – Екатеринбург, 2012. – Т.2. – С. 205-209 (0,25 п.л. / 0,2 п.л.).
13. Костарев И.А. О выборе резистора для обеспечения селективности защит от однофазных замыканий в сетях 6-35 кВ с комбинированным заземлением нейтрали / И.А. Костарев // Наука. Технологии. Инновации: материалы всерос. науч. конф. мол. ученых, г. Новосибирск, 29 нояб.-2 дек. 2012 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – Ч.5. – С. 135-140 (0,3 п.л.).
14. Костарев И.А. Имитационная модель защиты от однофазных замыканий на землю для сети с компенсированной нейтралью / М.Л. Сапунков, А.А. Худяков, И.А. Костарев // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы краевой науч.-техн. конф., г. Пермь, 17 мая 2012 г. – Пермь, 2012. – С. 126-129 (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).
15. Костарев И.А. О влиянии высших гармоник на работу защиты от однофазных замыканий, основанной на контроле пульсирующей мощности, в сети с компенсированной нейтралью / И.А. Костарев // Тинчуринские чтения: материалы докл. VIII междунар. мол. науч. конф., г. Казань, 27-29 марта 2013 г. – Казань, 2013. – Т.1. – С. 81-82 (0,16 п.л.).
16. Kostarev I.A. Resistor value for new protection against ground fault selectivity provided by 6-35 kV network with combined grounding of neutral / I.A. Kostarev // Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности: тез. докл. II Междунар. науч. конф., г. Пермь, 23 апр. 2013 г. – Пермь, 2013. – С. 65-67 (0,25 п.л.).
17. Костарев И.А. О влиянии несинусоидальности тока дугогасящего реактора на характеристики новой защиты от однофазных замыканий на землю / М.Л. Сапунков, И.А. Костарев // Фёдоровские чтения 2013: XLIII междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 6-9 нояб. 2013 г. – Москва, 2013 – С. 139 (0,16 п.л. / 0,1 п.л.).
18. Костарев И.А. О выборе резистора при комбинированном заземлении нейтрали для устойчивости функционирования новой защиты от однофазных замыканий на землю / И.А. Костарев // Тинчуринские чтения: материалы докл. IX междунар. мол. науч. конф.: г. Казань, 23-25 апреля 2014 г. – Казань, 2014. – Т.1. – С. 60 (0,16 п.л.).
19. Костарев И.А. Разработка и испытания опытного образца устройства защиты от однофазных замыканий на землю электрических сетей 6-35 кВ / М.Л. Сапунков, И.А. Костарев // Горная электромеханика – 2014: I междунар. науч.-практ. конф., Пермь, 27-30 окт. 2014 г. – Пермь, 2014. – С. 98-101 (0,38 п.л. / 0,3 п.л.).
20. Костарев И.А. Обеспечение устойчивости функционирования новой защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ путем комбинированного заземления нейтрали / М.Л. Сапунков, И.А. Костарев // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014: III междунар. конф., г. Екатеринбург, 17-20 марта 2014 г. – Екатеринбург, 2014. – С. 233-237 (0,5 п.л. / 0,3 п.л.).

Подписано в печать 11.03.15. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 706/2015.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии издательства

Пермского национального исследовательского

политехнического университета

614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.

Тел.: (342) 219-80-33.