

На правах рукописи



ХУДЯКОВ Антон Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПА ЗАЩИТЫ
ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ, ОСНОВАННОГО
НА КОНТРОЛЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 05.14.02

Электростанции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» на кафедре «Электрификация и автоматизация горных предприятий», г. Пермь.

Научный руководитель:

кандидат технических наук, профессор
САПУНКОВ Михаил Леонидович

Официальные оппоненты:

ШУИН Владимир Александрович,
доктор технических наук, профессор кафедры
АУЭС ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный
энергетический университет им. В.И. Ленина»

СУВОРОВ Антон Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры АЭС
УралЭНИН ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

Ведущая организация:

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

Защита состоится 27 июня 2012 г. в 14 ч.15 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. Э-406.

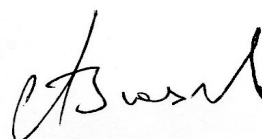
Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.285.03 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ.

Факс: (343) 359-16-15; e-mail: mob2011@bk.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «УрФУ имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан 25 мая 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.285.03, д.т.н., доцент



Зюзов А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Распределительные сети напряжением 6-35 кВ являются важным звеном современных электроэнергетических систем. От надежной работы сетей 6-35 кВ зависит надежная и бесперебойная работа большого числа потребителей, энергоэффективность и безопасность производства.

Наиболее частым видом повреждений в таких сетях являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), доля которых может составлять 70-80 % от общего числа повреждений. Причины возникновения ОЗЗ весьма разнообразны и в ряде ситуаций ОЗЗ являются неизбежными. Если возникшее ОЗЗ не устранить своевременно, то оно, как правило, может перейти в более тяжелое по последствиям аварийное повреждение: междуфазное короткое замыкание, двойное замыкание на землю и др. Это вызовет неоправданные перерывы в электроснабжении потребителей, необходимость восстановительных ремонтов. Кроме того, ОЗЗ могут сопровождаться возникновением в сети феррорезонансных процессов, массовым повреждением изоляции оборудования, разрушением железобетонных опор воздушных ЛЭП, повышенной опасностью случайного попадания людей и животных под напряжение.

В течение последних десятилетий накоплен большой опыт разработки и внедрения различных способов и устройств защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ. Однако анализ результатов применения известных защит от ОЗЗ свидетельствует о недостаточной селективности действия и надежности устройств этих защит. Многообразие видов ОЗЗ, специфика и сложность процессов при замыканиях на землю в сетях с различными режимами заземления нейтрали предопределяют сложность задачи создания всережимной универсальной защиты от ОЗЗ. Разработке новых и совершенствованию известных защит от ОЗЗ большое внимание уделено в работах Ф.А. Лихачева, И.М. Сироты, В.М. Кискачи, Е.Ф. Цапенко, К.П. Кадомской, В.К. Обабкова, Г.А. Евдокунина, Л.И. Сарина, М.А. Шабада, А.И. Шалина, В.А. Шуина, Р.А. Вайнштейна и др. Тем не менее, практически ни одно из наиболее распространенных устройств защиты от ОЗЗ не может быть признано достаточно полно удовлетворяющим требованиям эксплуатации.

Несмотря на многообразие известных способов и устройств защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ, задача создания более совершенной защиты является весьма актуальной.

Цели работы. Теоретическое обоснование возможности создания селективной защиты от ОЗЗ, основанной на контроле изменений пульсирующей мощности, для электрических сетей 6-35 кВ с различными режимами заземления нейтрали. Разработка практических рекомендаций по технической реализации структурно-функциональной схемы новой защиты.

Задачи исследования. В соответствии с поставленными целями в работе решаются следующие задачи:

- исследование закономерностей изменения пульсирующей мощности защищаемых линий сети;
- разработка алгоритма функционирования защиты от ОЗЗ, основанной на контроле изменений пульсирующей мощности защищаемых линий;
- разработка математической модели распределительной сети, отражающей основные процессы, на которых основан предлагаемый алгоритм функционирования защиты;

- оценка влияния на успешность функционирования защиты различных факторов, к основным из которых относятся: возможная несимметрия напряжений источника питания, возможная несинусоидальность напряжений источника питания, возможная естественная асимметрия собственных проводимостей на землю фаз защищаемых линий;
- экспериментальная проверка работоспособности предлагаемого алгоритма защиты на физической модели распределительной сети;
- разработка рекомендаций для технической реализации устройства защиты от ОЗЗ, функционирующей по предлагаемому алгоритму, с применением современной микропроцессорной элементной базы.

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

Предмет исследования – новый принцип контроля возникновения ОЗЗ в распределительных сетях 6-35 кВ.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы: методы математического и имитационного моделирования на базе теории электрических цепей и спектрального анализа с применением современных компьютерных технологий; экспериментальные исследования путем физического моделирования в лабораторных условиях. В работе использованы некоторые результаты научных трудов российских и зарубежных специалистов, материалы научно-технических конференций и семинаров.

Достоверность результатов исследования. Адекватность моделей и методов, использованных в работе, подтверждается известными фундаментальными теориями и методами исследования электрических процессов при однофазных замыканиях на землю, результатами вычислительных и натурных экспериментов.

Научная новизна работы:

- 1) впервые в области релейной защиты от ОЗЗ распределительных сетей 6-35 кВ предложено использовать новый принцип контроля возникновения замыкания на землю по изменению пульсирующей мощности трехфазных линий;
- 2) теоретически обоснован новый способ и разработан алгоритм функционирования защиты распределительных сетей от ОЗЗ, основанный на контроле изменений пульсирующей мощности;
- 3) установлено, что при возникновении ОЗЗ в распределительной сети приращение пульсирующей мощности на всех неповрежденных линиях равно нулю, а на поврежденной линии приращение пульсирующей мощности пропорционально величине общего для сети тока ОЗЗ;
- 4) установлено, что на величину пульсирующей мощности защищаемых линий оказывают влияние возможная несимметрия и несинусоидальность напряжений источника питания, возможная естественная асимметрия собственных проводимостей фаз линий на землю; сделана оценка влияния этих факторов на успешность функционирования защиты.

Практическая значимость и реализация результатов работы. Основные теоретические результаты работы использованы при разработке алгоритма и модели устройства новой защиты от ОЗЗ, основанной на контроле пульсирующей мощности защищаемых линий. Модель устройства защиты реализована на базе персонального компьютера с применением современных микропроцессорных устройств, апробирована на физической модели распреде-

лительной сети и может служить основой для разработки промышленных терминалов новой высокоэффективной защиты. Разработаны практические рекомендации для технической проработки устройства новой защиты.

Разработанная математическая модель распределительной сети 6-35 кВ может быть использована для исследований, направленных на усовершенствование известных и разработку новых способов защит от ОЗЗ, а также в практике расчета и проектирования систем релейной защиты и автоматики.

Результаты исследований, полученные в работе, используются в учебном процессе кафедры Электрификации и автоматизации горных предприятий Пермского национального исследовательского политехнического университета при изучении ряда учебных дисциплин, при выполнении научно-исследовательских работ, а также при курсовом и дипломном проектировании.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) теоретическое обоснование возможности создания новой защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ, основанной на контроле изменений пульсирующей мощности защищаемых линий;
- 2) структурно-функциональная схема реализации нового способа защиты от ОЗЗ;
- 3) математическая модель распределительной сети 6-35 кВ, учитывающая основные факторы и процессы, определяющие характер и закономерности изменений пульсирующей мощности, контролируемой для целей защиты, применительно к различным режимам заземления нейтрали;
- 4) результаты исследований и оценка влияния на успешность функционирования защиты от ОЗЗ факторов несимметрии и несинусоидальности в распределительной сети, полученные путем вычислительных и натурных экспериментов;
- 5) практические рекомендации для технической проработки устройства защиты от ОЗЗ, основанной на контроле пульсирующей мощности, с применением современной микропроцессорной элементной базы.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, и региональных научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция Проблемы рационального природопользования (г. Пермь, 2007, 2008 г.г.); Международная научно-техническая конференция «Нефтегазовое и горное дело» (г. Пермь, 2009 г.); Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (г. Иваново, 2011 г.); научный симпозиум «Неделя горняка» (г. Москва, 2011 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий» (г. Уфа, 2007 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Инновационная энергетика» (г. Пермь, 2009, 2011 г.г.); Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Федоровские чтения» (г. Москва, 2010 г.); Всероссийская научно-техническая конференция (с международным участием) «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» (г. Екатеринбург, 2011 г.).

Результаты работы экспонировались на выставках: XIII Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий «Архимед» (г. Москва, 2010 г.); 13-я межрегиональная специализированная выставка технологий и оборудования для нефтяной, газовой и химической промышленности «Нефть. Газ. Химия» (г. Пермь, 2011 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 11 печатных работ, в т.ч. 3 работы в изданиях списка ВАК РФ, получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 79 наименований. Общий объем работы составляет 146 страниц и содержит 39 рисунков и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведены результаты выполненного аналитического обзора известных способов защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ, отмечены их достоинства и недостатки.

Область успешного применения известных способов и устройств защиты распределительных сетей от ОЗЗ зависит от многих факторов и ограничивается, главным образом, режимом заземления нейтрали сети. До настоящего времени, несмотря на многочисленные проведенные исследования и разработки, ни один из известных способов не является универсальным, пригодным для применения в сетях с различным режимом заземления нейтрали. Каждый из рассмотренных способов характеризуется специфическими особенностями и только в определенных условиях может обеспечить приемлемые результаты. Основные причины недостаточной селективности действия и надежности известных устройств защит заключаются в нестабильности конфигурации распределительной сети, сложности процессов при замыканиях на землю, изменении во времени режимов и характера нагрузок линий и влияния других факторов.

Вместе с тем накопленный опыт разработки и применения известных способов и устройств защиты от ОЗЗ позволяет обосновать более эффективные способы защиты, основанные на новых, более достоверных признаках контроля режима ОЗЗ.

Во второй главе на примере симметричной распределительной сети с изолированной нейтралью приведено аналитическое обоснование нового способа защиты от ОЗЗ, основанного на контроле пульсирующей мощности.

Суть нового способа защиты заключается в том, что по измеренным токам защищаемой линии и напряжениям источника питания относительно изолированной нейтрали вычисляют суммарную мгновенную мощность линии, а также ее среднее значение. Затем путем вычитания из мгновенной мощности ее среднего значения определяют переменную составляющую мощности (пульсирующую мощность)

$$p_{\Pi} = p - P_{CP} = (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C) - P_{CP}, \quad (1)$$

где $p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C$ - мгновенная мощность линии; $u_A, u_B, u_C, i_A, i_B, i_C$ - мгновенные значения напряжений источника и токов трех фаз линии; $P_{CP} = 1/T \int_0^T p(t) dt$ - среднее значение мгновенной мощности (активная мощность).

Для целей защиты используют величину изменения (приращения) пульсирующей мощности защищаемых линий при возникновении ОЗЗ в сети.

В нормальном режиме работы рассматриваемой симметричной сети мгновенная мощность любой линии будет равна средней (активной) мощности нагрузки линии, пульсирующая мощность при этом отсутствует.

При возникновении ОЗЗ мгновенная мощность любой линии сети также содержит составляющую активной мощности нагрузки линии. При этом только на поврежденной линии замыкание фазы на землю обуславливает синусоидальную составляющую (пульсирующую мощность) с частотой, равной удвоенной частоте сети и амплитудой, прямо пропорциональной общему для сети току ОЗЗ. Это обстоятельство является отличительным и новым признаком контроля ОЗЗ в распределительной сети и позволяет однозначно идентифицировать поврежденную линию.

Упрощенная структурно-функциональная схема предлагаемой защиты от ОЗЗ приведена на рис. 1.

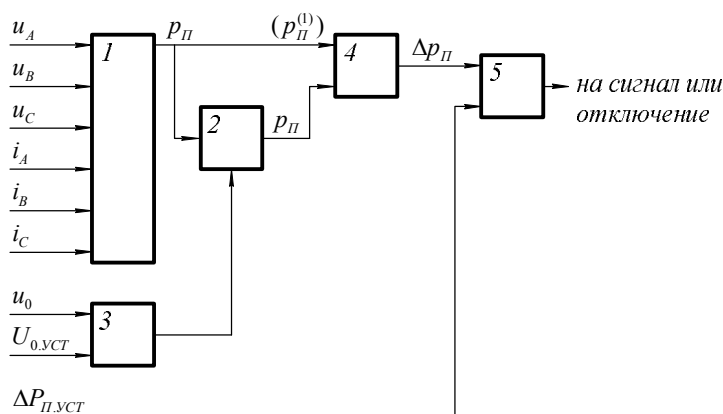


Рис. 1. Упрощенная структурно-функциональная схема защиты.

Схема содержит измерительно-вычислительный модуль 1, в котором по измеряемым напряжениям u_A, u_B, u_C и токам трех фаз линии i_A, i_B, i_C производятся вычисления мгновенной мощности линии, ее среднего значения и пульсирующей мощности. Вычисленное значение пульсирующей мощности линии запоминается в блоке памяти 2. Вычисления происходят непрерывно – до ОЗЗ и после возникновения ОЗЗ. За-

поминание приостанавливается при появлении в сети напряжения нулевой последовательности u_0 определенной величины, контролируемого пусковым органом защиты 3. В функциональном элементе 4 вычисляется разность между текущим значением пульсирующей мощности в режиме ОЗЗ $p_{П}^{(1)}$ и запомненным ранее значением этой мощности до ОЗЗ $p_{П}$. В результате формируется сигнал приращения пульсирующей мощности $\Delta p_{П}$, поступающий на исполнительный орган защиты 4, где сравнивается с величиной уставки $\Delta P_{П.уст}$. Если приращение пульсирующей мощности линии превысит заданную уставку, то эта линия фиксируется как поврежденная и подается сигнал на срабатывание защиты.

Возможен и другой алгоритм работы исполнительного органа защиты, основанный на сравнении между собой приращений пульсирующих мощностей всех защищаемых линий (рис. 2). При этом поврежденная линия в сети фиксируется по наибольшей величине приращения. В этом варианте работы защиты исполнительный орган должен являться общим для всех линий секции шин сети.

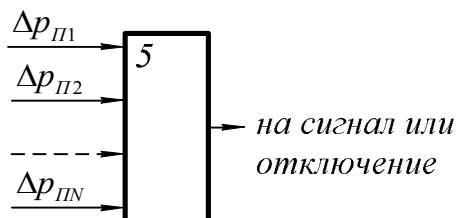


Рис. 2. Исполнительный блок защиты, выполненный в виде максиселектора.

В третьей главе описана разработанная математическая модель распределительной сети 6-35 кВ для исследования особенностей функционирования защиты от ОЗЗ при различных вариантах заземления нейтрали. Модель позволяет провести исследования и сделать оценку влияния различных факторов на величину и характер пульсирующей мощности защищаемых линий.

Модель разрабатывалась на основе расчетной схемы замещения распределительной сети, содержащей источник питания и несколько отходящих от секции шин линий в виде сосредоточенных проводимостей на землю, одна из которых являлась поврежденной.

Элемент заземления нейтрали сети (реактор, резистор или их комбинация) учитывался комплексным сопротивлением соответственно режиму заземления нейтрали, подключенным к секции шин через специальный трансформатор присоединений.

Также учитывалось, что при практической реализации защиты от ОЗЗ целесообразно вместо фазных напряжений источника питания, измеряемых относительно изолированной нейтрали трехфазной системы, использовать междуфазные (линейные) напряжения. В этом варианте функционирования защиты ее устройства можно будет подключать к имеющимся на подстанциях измерительным трансформаторам напряжения непосредственно.

Установлено, что использование для функционирования защиты от ОЗЗ линейных напряжений вместо фазных приводит лишь к одинаковому изменению величины и изменению фазы анализируемых приращений пульсирующей мощности.

Для математического описания процессов в распределительной сети использовался метод сопряженных комплексных амплитуд.

Согласно этому методу для анализа пульсирующей мощности линии, используемой для целей защиты и являющейся гармонической функцией времени, анализировалось изменение комплексной амплитуды этой мощности

$$\dot{P}_\Pi = \dot{U}_{AB} \dot{I}_A + \dot{U}_{BC} \dot{I}_B + \dot{U}_{CA} \dot{I}_C, \quad (2)$$

где $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ - комплексы линейных напряжений источника; $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ - комплексы линейных токов линии.

С учетом выражения (2), выражения для комплексов приращений пульсирующей мощности, контролируемых для целей защиты, при замыкании в сети, например, фазы А на землю:

- для поврежденной линии (индекс α)

$$\Delta \dot{P}_{\Pi\alpha} = \Delta \dot{U}_{\Phi(3)} (Y_{A\alpha} \dot{U}_{AB} + Y_{B\alpha} \dot{U}_{BC} + Y_{C\alpha} \dot{U}_{CA}) + \dot{I}_3^{(1)} \dot{U}_{AB}, \quad (3)$$

- для любой неповрежденной линии (индекс β)

$$\Delta \dot{P}_{\Pi\beta} = \Delta \dot{U}_{\Phi(3)} (Y_{A\beta} \dot{U}_{AB} + Y_{B\beta} \dot{U}_{BC} + Y_{C\beta} \dot{U}_{CA}), \quad (4)$$

где $Y_{A\alpha}, Y_{B\alpha}, Y_{C\alpha}, Y_{A\beta}, Y_{B\beta}, Y_{C\beta}$ - комплексные проводимости фаз поврежденной и неповрежденной линии сети на землю; $\Delta \dot{U}_{\Phi(3)}$ - показатель изменения фазных напряжений сети при возникновении ОЗЗ; $\dot{I}_3^{(1)}$ - комплекс тока ОЗЗ.

Ток ОЗЗ

$$\dot{I}_3^{(1)} = \frac{g_3 [(Y_{B\Sigma} + \lambda Y_{Bmp}) \dot{U}_{AB} - (Y_{C\Sigma} + \lambda Y_{Cmp}) \dot{U}_{CA}]}{Y_\Sigma + \lambda Y_{\Sigma mp} + g_3}, \quad (5)$$

где $Y_{\Sigma} = Y_{A\Sigma} + Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma}$ - суммарная проводимость фаз всех линий сети на землю, $Y_{\Sigma mp} = Y_{Amp} + Y_{Bmp} + Y_{Cmp}$ - суммарная проводимость фаз первичной обмотки трансформатора присоединения, $\lambda = Y_N / (Y_N + Y_{\Sigma mp})$ - комплексный показатель, характеризующий режим заземления нейтрали сети; Y_N - комплексная проводимость элемента заземления нейтрали; g_3 - проводимость на землю в месте возникновения ОЗЗ.

Если не учитывать незначительное изменение фазных напряжений линий относительно земли из-за падения напряжения на их продольных сопротивлениях, то можно считать, что разность фазных напряжений для смежных фаз всегда равна линейному напряжению. Это обстоятельство для анализа приращений пульсирующей мощности характеризуется общим показателем изменения фазных напряжений при ОЗЗ

$$\Delta \dot{U}_{\phi(3)} = \frac{g_3 \left[(Y_{C\Sigma} + \lambda Y_{Cmp}) \dot{U}_{CA} - (Y_{B\Sigma} + \lambda Y_{Bmp}) \dot{U}_{AB} \right]}{(Y_{\Sigma} + \lambda Y_{\Sigma mp})(Y_{\Sigma} + \lambda Y_{\Sigma mp} + g_3)}. \quad (6)$$

Полученные выражения (3) и (4), с учетом (5) и (6) позволяют проводить расчеты приращений пульсирующей мощности защищаемых линий при возникновении в сети ОЗЗ. Путем варьирования расчетных параметров можно осуществлять моделирование различных режимов заземления нейтрали, разных ситуаций по степени несимметрии в сети, по соотношению параметров поврежденной и неповрежденных линий, а также учитывать другие различные факторы.

Адекватность модели подтверждена сопоставлением временных зависимостей токов и напряжений в сети, полученных в результате расчетов, с аналогичными зависимостями, приведенными в фундаментальных исследованиях других авторов.

В четвертой главе приведены результаты исследований и оценка влияния на успешность функционирования защиты факторов несимметрии и несинусоидальности в распределительной сети.

При исследованиях напряжение источника питания принято 6,3 кВ, суммарный емкостной ток сети 30 А. Естественный коэффициент демпфирования, обусловленный активными проводимостями фаз сети на землю, составлял 0,04. Параметры линий распределительной сети учитывались относительным показателем $m = (C_A + C_B + C_C) / C_{\Sigma}$, где C_A, C_B, C_C - емкости фаз линии относительно земли, C_{Σ} - суммарная емкость сети на землю, характеризующим долю собственных емкостей линии относительно земли в суммарной емкости сети.

Из выражений (3) и (4) видно, что величина приращений пульсирующей мощности любой линии сети зависит от возможной несимметрии напряжений источника питания и возможной асимметрии собственных проводимостей фаз на землю.

При возникновении в сети ОЗЗ наличие этих факторов будет обуславливать на любой неповрежденной линии приращение пульсирующей мощности в виде сигнала помехи для функционирования защиты; на поврежденной линии – дополнительную составляющую пульсирующей мощности к полезному для защиты сигналу.

Несимметрию линейных напряжений в электрических сетях согласно ГОСТу 13109-97 принято оценивать коэффициентом несимметрии по обратной последовательности, характеризующий лишь амплитудную несимметрию напряжений. В проведенном исследовании для одновременной оценки амплитудной и фазовой несимметрии напряжений

источника использовался комплексный показатель $\dot{\varepsilon}_{U_2} = \dot{U}_2 / \dot{U}_1$, где \dot{U}_1, \dot{U}_2 - комплексы напряжений прямой и обратной последовательности. Величина модуля показателя $\dot{\varepsilon}_{U_2}$ для распределительных сетей не должна превышать значения 0,04, а фазовый аргумент φ_ε , как установлено расчетами, может изменяться в диапазоне от 0° до 360° .

Асимметрия емкостных проводимостей фаз на землю любой линии распределительной сети характеризовалась относительным комплексным показателем

$$\dot{\sigma} = \frac{C_A + a^2 C_B + a C_C}{C_A + C_B + C_C}. \quad (7)$$

Установлено, что при изменении C_B/C_A и C_C/C_A в диапазоне от 0,8 до 1,2 величина модуля показателя $\dot{\sigma}$ может достигать значения 0,12. При этом фазовый аргумент показателя асимметрии φ_σ изменяется в диапазоне от 0° до 360° .

Результаты исследований показали, что несимметрия напряжений источника питания обуславливает дополнительную составляющую приращения пульсирующей мощности только на поврежденной линии. Причем величина этой составляющей зависит от модуля комплексного показателя несимметрии источника, а ее влияние на полезный сигнал защиты (увеличение или уменьшение) – от фазового аргумента φ_ε показателя $\dot{\varepsilon}_{U_2}$.

На рис. 3 – рис. 5 приведены зависимости относительной величины $\Delta P_{Па}^* = \Delta P_{Па} / \Delta P_{Пбаз}$, где $\Delta P_{Па}$ - приращение пульсирующей мощности поврежденной линии при несимметрии напряжений источника питания, $\Delta P_{Пбаз}$ - приращение пульсирующей мощности поврежденной линии в симметричной сети с изолированной нейтралью, как некоторая базовая величина, характеризующие влияние несимметрии напряжений источника питания на полезный сигнал защиты применительно к сети с изолированной, компенсированной и резистивно-заземленной нейтралью.

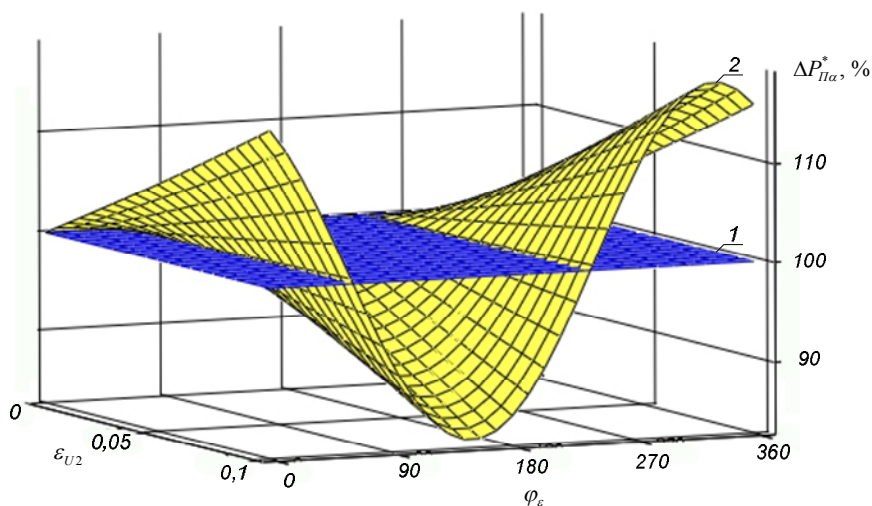


Рис. 3. Зависимости, характеризующие влияние $\dot{\varepsilon}_{U_2}$ на полезный сигнал защиты применительно к сети с изолированной нейтралью: 1 – $\dot{\varepsilon}_{U_2} = 0$; 2 – $\varepsilon_{U_2} = 0..0,1$; $\varphi_\varepsilon = 0^\circ..360^\circ$.

По результатам расчетов и анализа установлено, что в сети с изолированной нейтралью наибольшее уменьшение полезного сигнала защиты будет при $\varphi_\varepsilon = 150^\circ$, наибольшее увеличение – при $\varphi_\varepsilon = 330^\circ$. При этом, если величина модуля $\dot{\varepsilon}_{U_2}$ не будет превышать нормируемых значений ($\varepsilon_{U_2} \leq 0,04$), то уменьшение полезного сигнала защиты может составить

всего 7 %. Однако даже в недопустимом случае, когда $\varepsilon_{U_2} = 0,1$ наибольшее уменьшение полезного сигнала защиты составит около 16 %.

В компенсированной сети полезный сигнал защиты уменьшается. Объясняется это, прежде всего, малыми значениями тока ОЗЗ. При симметричном источнике питания (на рис. 4 кривая 1) и резонансной настройке заземляющего реактора полезный сигнал защиты при прочих равных условиях составляет 9 % от аналогичного сигнала в сети с изолированной нейтралью и обусловлен только активной составляющей тока ОЗЗ. Однако с учетом того, что на любой неповрежденной линии сети величина приращения пульсирующей мощности будет равна нулю, можно считать, что и в сети с компенсацией емкостных токов по приращению пульсирующей мощности можно однозначно идентифицировать поврежденную линию.

Заземление нейтрали сети через резистор способствует увеличению полезного сигнала защиты. Если величина заземляющего резистора выбрана из условия $R_N = 1/\omega C_\Sigma$ (относительная проводимость заземления нейтрали $d_N = g_N/\omega C_\Sigma = 1$), то полезный сигнал защиты в сети с симметричным источником питания (на рис. 5 кривая 1) увеличится на 44 %. Уменьшение величины заземляющего резистора будет существенно повышать величину приращения пульсирующей мощности поврежденной линии.

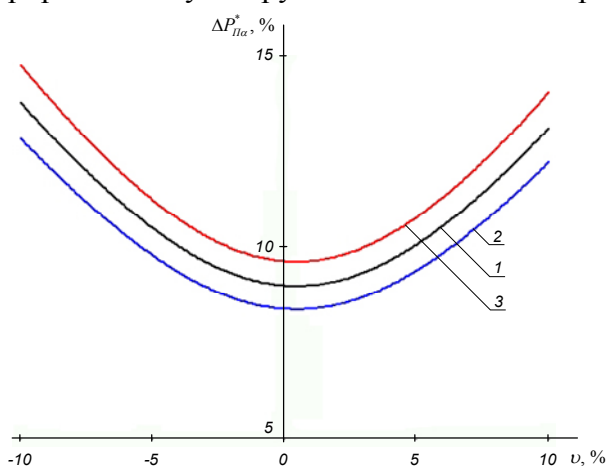


Рис. 4. Зависимости, характеризующие влияние $\dot{\varepsilon}_{U2}$ на полезный сигнал защиты, применительно к сети с компенсированной нейтралью:

$$1 - \dot{\varepsilon}_{U2} = 0; \quad 2 - \varepsilon_{U2} = 0,04; \quad \varphi_\varepsilon = 150^\circ;$$

$$3 - \varepsilon_{U2} = 0,04; \quad \varphi_\varepsilon = 330^\circ.$$

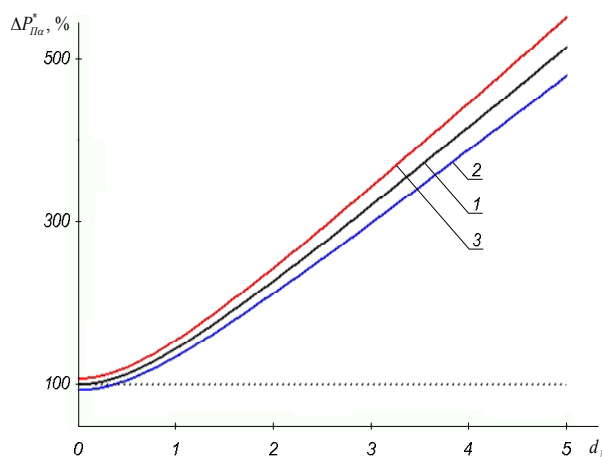


Рис. 5. Зависимости, характеризующие влияние $\dot{\varepsilon}_{U2}$ на полезный сигнал защиты, применительно к сети с резистивно-заземленной нейтралью:

$$1 - \dot{\varepsilon}_{U2} = 0; \quad 2 - \varepsilon_{U2} = 0,04; \quad \varphi_\varepsilon = 150^\circ;$$

$$3 - \varepsilon_{U2} = 0,04; \quad \varphi_\varepsilon = 330^\circ.$$

Наличие несимметрии напряжений источника питания в сети с компенсированной или резистивно-заземленной нейтралью обуславливает дополнительную составляющую приращения мощности. Влияние этой составляющей аналогично случаю, когда сеть работает с изолированной нейтралью.

На рис. 6 – рис. 9 приведены зависимости, характеризующие влияние асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю на приращения пульсирующей мощности, контролируемые для целей защиты.

Установлено, что на любой неповрежденной линии приращение пульсирующей мощности, обусловленное асимметрией собственных проводимостей фаз линии на землю, зависит только от модуля показателя асимметрии линии $\dot{\sigma}_\beta$ и от показателя m_β и не зависит от режима заземления нейтрали.

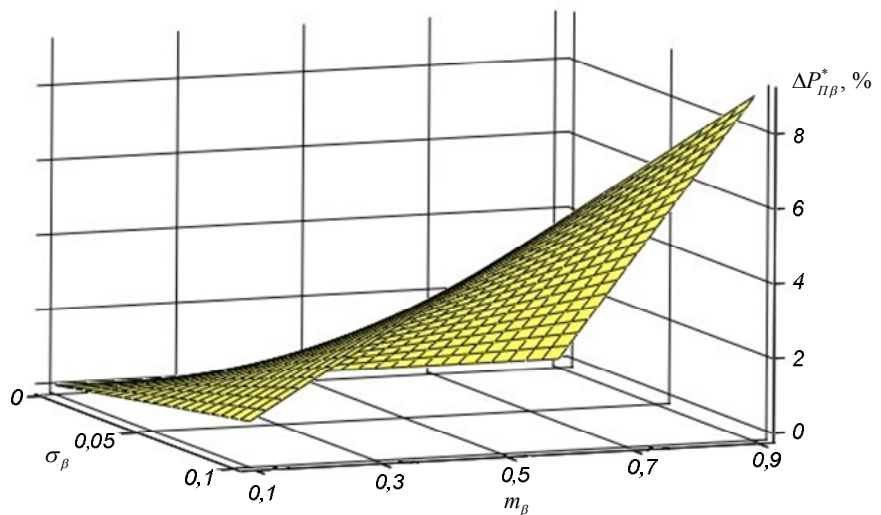


Рис. 6. Зависимость, характеризующая влияние $\dot{\sigma}$ на сигнал помехи.

На поврежденной линии асимметрия собственных проводимостей фаз на землю обуславливает дополнительную составляющую пульсирующей мощности, которая может как увеличивать, так и уменьшать полезный сигнал защиты. Применительно к сети с изолированной нейтралью наибольшее уменьшение полезного сигнала защиты будет при $\varphi_{\sigma(\alpha)} = 180^\circ$, а наибольшее уменьшение – при $\varphi_{\sigma(\alpha)} = 0^\circ$.

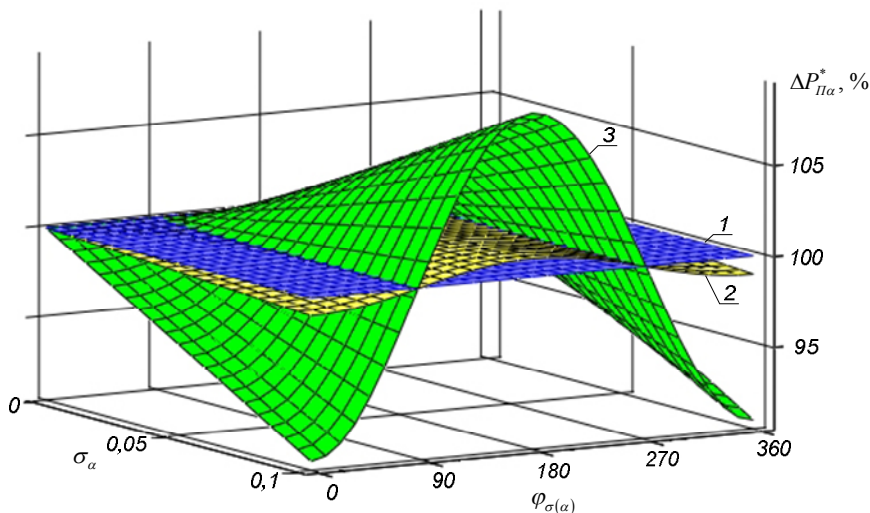


Рис. 7. Зависимости, характеризующие влияние $\dot{\sigma}$ на полезный сигнал защиты применительно к сети с изолированной нейтралью: 1 – $\dot{\sigma}_\alpha = 0$; 2 – $\sigma_\alpha = 0..0,1$; $\varphi_{\sigma(\alpha)} = 0^\circ..360^\circ$; $m_\alpha = 0,1$; 3 – $\sigma_\alpha = 0..0,1$; $\varphi_{\sigma(\alpha)} = 0^\circ..360^\circ$; $m_\alpha = 0,9$.

В сети с компенсированной нейтралью наибольшее уменьшение полезного сигнала защиты будет при резонансной настройке дугогасящего реактора, когда $\varphi_{\sigma(\alpha)} \approx 270^\circ$.

По результатам расчетов установлено, что в общем случае, когда показатель доли емкостных токов на землю поврежденной линии от суммарного тока замыкания в сети составляет 30 % ($m_\alpha = 0,3$), то наименьшее значение величины $\Delta P_{Па}^*$ при наличии значитель-

В общем случае, когда поврежденная и неповрежденная линии в сети с изолированной нейтралью соизмеримы по показателю m ($m_\alpha = m_\beta = 0,3$), а величины показателей их собственной асимметрии значительные ($\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 0,1$), то отношение сигнала помехи на неповрежденной линии к полезному сигналу защиты на поврежденной линии может составить всего около 3%.

В сети с компен-

ной асимметрии собственных проводимостей линии ($\sigma_\alpha = 0,1$) применительно к сети с компенсированной нейтралью может составить 6 %.

На неповрежденной линии при тех же значениях показателей $m_\beta = 0,3$ и $\sigma_\beta = 0,1$ величина $\Delta P_{\Pi\beta}^* = 3\%$, т.е. минимальное отношение величины сигнала помехи на неповрежденной линии к полезному для защиты сигналу на поврежденной линии составит 50 %.

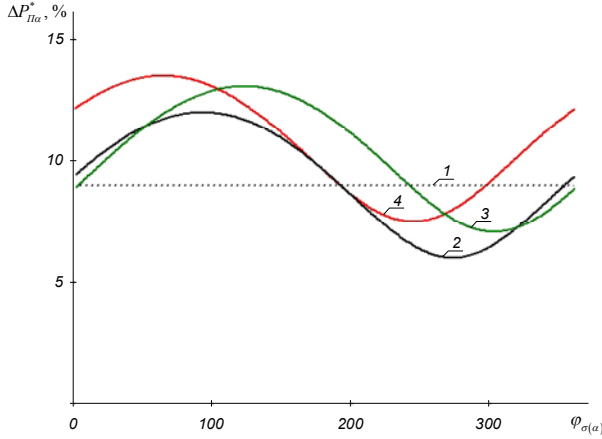


Рис. 8. Зависимости, характеризующие влияние $\dot{\sigma}$ на полезный сигнал защиты применительно к сети с компенсированной нейтралью $m_\alpha = 0,3$: 1 – $\sigma_\alpha = 0$;

2 – $\sigma_\alpha = 0,1$, $\nu = 0$; 3 – $\sigma_\alpha = 0,1$, $\nu = 5\%$;

4 – $\sigma_\alpha = 0,1$, $\nu = -5\%$.

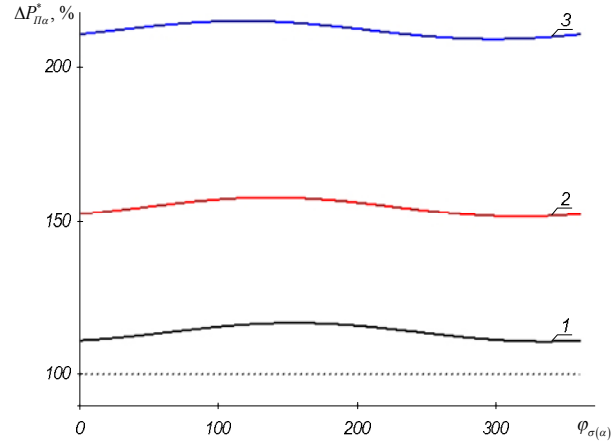


Рис. 9. Зависимости, характеризующие влияние $\dot{\sigma}$ на полезный сигнал защиты применительно к сети с резистивно-заземленной нейтралью, $\sigma_\alpha = 0,1$, $m_\alpha = 0,3$:

1 – $d_N = 0,5$; 2 – $d_N = 1$; 3 – $d_N = 2$.

В сети с резистивно-заземленной нейтралью влияние асимметрии поврежденной линии на полезный для защиты сигнал будет аналогичным, т.е. в зависимости от значения аргумента показателя асимметрии возможно как уменьшение, так и увеличение величины полезного сигнала. Однако применение в сети заземляющего резистора позволяет значительно повысить полезный сигнал защиты.

При наличии в сети несинусоидальности напряжений источника питания переменную составляющую мгновенной мощности любой линии сети можно представить в виде суммы двух составляющих: пульсирующей мощности, обусловленной несимметрией напряжений и токов основной гармоники, и дополнительной переменной составляющей мощности, обусловленной высшими гармониками

$$p_{\sim}(t) = p_{\Pi} + p_{\sim(\text{доп})} = \sum_{\mu=1}^{\infty} \sum_{\nu=1}^{\infty} \operatorname{Re} \left\{ \left(\dot{S}_{\mu\nu} e^{j(\mu-\nu)\omega t} \right)_{\mu \neq \nu} - \dot{S}_{\Pi\mu\nu} e^{j(\mu+\nu)\omega t} \right\}, \quad (8)$$

где $\dot{S}_{\mu\nu} = \dot{U}_{AB\mu} I_{Av}^* + \dot{U}_{BC\mu} I_{Bv}^* + \dot{U}_{CA\mu} I_{Cv}^*$, $\dot{S}_{\Pi\mu\nu} = \dot{U}_{AB\mu} \dot{I}_{Av} + \dot{U}_{BC\mu} \dot{I}_{Bv} + \dot{U}_{CA\mu} \dot{I}_{Cv}$ – комплексная полная и комплексная пульсирующая мощности, обусловленные μ -й гармоникой линейных напряжений источника питания и ν -й гармоникой токов фаз линии.

В выражении (8) первая составляющая обусловлена разночастотными гармониками напряжений и токов. При синусоидальных напряжениях источника и токах фаз линии эта составляющая будет равна нулю. Вторая переменная составляющая мощности обусловлена несимметрией отдельных гармоник напряжений и токов. Эта составляющая будет равна нулю только в случае, когда отдельные гармоники напряжений и токов линии симметричны.

В нормальном режиме работы сети комплексы полной и пульсирующей мощности любой линии сети

$$\begin{aligned}\dot{S}_{\mu\nu} &= \dot{U}_{Л\mu} \left(Y_{Av}^* U_{A(3)\nu}^* + a^{2\mu} Y_{Bv}^* U_{B(3)\nu}^* + a^\mu Y_{Cv}^* U_{C(3)\nu}^* \right), \\ \dot{S}_{П\mu\nu} &= \dot{U}_{Л\mu} \left(Y_{Av} \dot{U}_{A(3)\nu} + a^{2\mu} Y_{Bv} \dot{U}_{B(3)\nu} + a^\mu Y_{Cv} \dot{U}_{C(3)\nu} \right),\end{aligned}\quad (9)$$

где $Y_{Av}^*, Y_{Bv}^*, Y_{Cv}^*$ - сопряженные комплексные проводимости на землю линии для ν -й гармоники тока; $U_{A(3)\nu}^*, U_{B(3)\nu}^*, U_{C(3)\nu}^*$ - сопряженные комплексы ν -й гармоники фазных напряжений сети относительно земли в нормальном режиме работы.

При замыкании в сети фазы А на землю комплексы переменных составляющих мощности:

- для поврежденной линии α

$$\begin{aligned}\dot{S}_{\alpha\mu\nu} &= \dot{U}_{Л\mu} \left(Y_{A\alpha\nu}^* U_{A(3)\nu}^{*(1)} + a^{2\mu} Y_{B\alpha\nu}^* U_{B(3)\nu}^{*(1)} + a^\mu Y_{C\alpha\nu}^* U_{C(3)\nu}^{*(1)} + \dot{I}_{3\nu}^{*(1)} \right), \\ \dot{S}_{П\alpha\mu\nu} &= \dot{U}_{Л\mu} \left(Y_{A\alpha\nu} \dot{U}_{A(3)\nu}^{(1)} + a^{2\mu} Y_{B\alpha\nu} \dot{U}_{B(3)\nu}^{(1)} + a^\mu Y_{C\alpha\nu} \dot{U}_{C(3)\nu}^{(1)} + \dot{I}_{3\nu}^{(1)} \right);\end{aligned}\quad (10)$$

- для любой неповрежденной линии β

$$\begin{aligned}\dot{S}_{\beta\mu\nu} &= \dot{U}_{Л\mu} \left(Y_{A\beta\nu}^* U_{A(3)\nu}^{*(1)} + a^{2\mu} Y_{B\beta\nu}^* U_{B(3)\nu}^{*(1)} + a^\mu Y_{C\beta\nu}^* U_{C(3)\nu}^{*(1)} \right), \\ \dot{S}_{П\beta\mu\nu} &= \dot{U}_{Л\mu} \left(Y_{A\beta\nu} \dot{U}_{A(3)\nu}^{(1)} + a^{2\mu} Y_{B\beta\nu} \dot{U}_{B(3)\nu}^{(1)} + a^\mu Y_{C\beta\nu} \dot{U}_{C(3)\nu}^{(1)} \right),\end{aligned}\quad (11)$$

где $Y_{A\alpha\nu}^*, Y_{B\alpha\nu}^*, Y_{C\alpha\nu}^*, Y_{A\beta\nu}^*, Y_{B\beta\nu}^*, Y_{C\beta\nu}^*$ - сопряженные комплексные проводимости на землю соответственно поврежденной и неповрежденной линии для ν -й гармоники тока; $\dot{I}_{3\nu}^{*(1)}$ - сопряженный комплекс ν -й гармоники тока ОЗЗ.

Из выражений (10) и (11) видно, что только на поврежденной линии обе составляющие переменной мощности зависят от общего для данной сети тока замыкания на землю и от его гармонического состава.

На рис. 10 в качестве примера приведены расчетные кривые переменной составляющей мгновенной мощности для неповрежденной и поврежденной линий сети. Эти кривые соответствуют случаю, когда линейные напряжения источника питания содержат 5, 7, 11 и 13-ю гармоники (гармоники более высокого порядка считались пренебрежимо малыми), уровень которых по отношению к основной гармонике составляет соответственно 4, 3, 2 и 2% (нормально-допустимые значения согласно ГОСТу 13109-97). При этом неповрежденная и поврежденная линии считались соизмеримыми по показателю m ($m_\alpha = m_\beta = 0,3$).

Из сравнения кривых видно, что при возникновении в сети ОЗЗ характер и величина переменной составляющей мощности на неповрежденной линии не изменились и контролируемое для целей защиты приращение мощности равно нулю.

На поврежденной линии переменная составляющая существенно изменилась как по величине, так и по характеру кривой. Это объясняется тем, что на поврежденной линии переменная составляющая мощности зависит главным образом от величины и характера кривой тока ОЗЗ и является результатом наложения пульсирующей мощности линии частотой 100 Гц и дополнительной переменной составляющей мгновенной мощности линии, обусловленной высшими гармониками напряжений и токов в сети. Именно величина приращения этой мощности является полезным сигналом защиты.

Установлено, что с ростом уровня гармоник приращение переменной составляющей мощности поврежденной линии увеличивается, т.е. наличие высших гармоник способствует увеличению полезного сигнала защиты и повышает селективность ее действия.

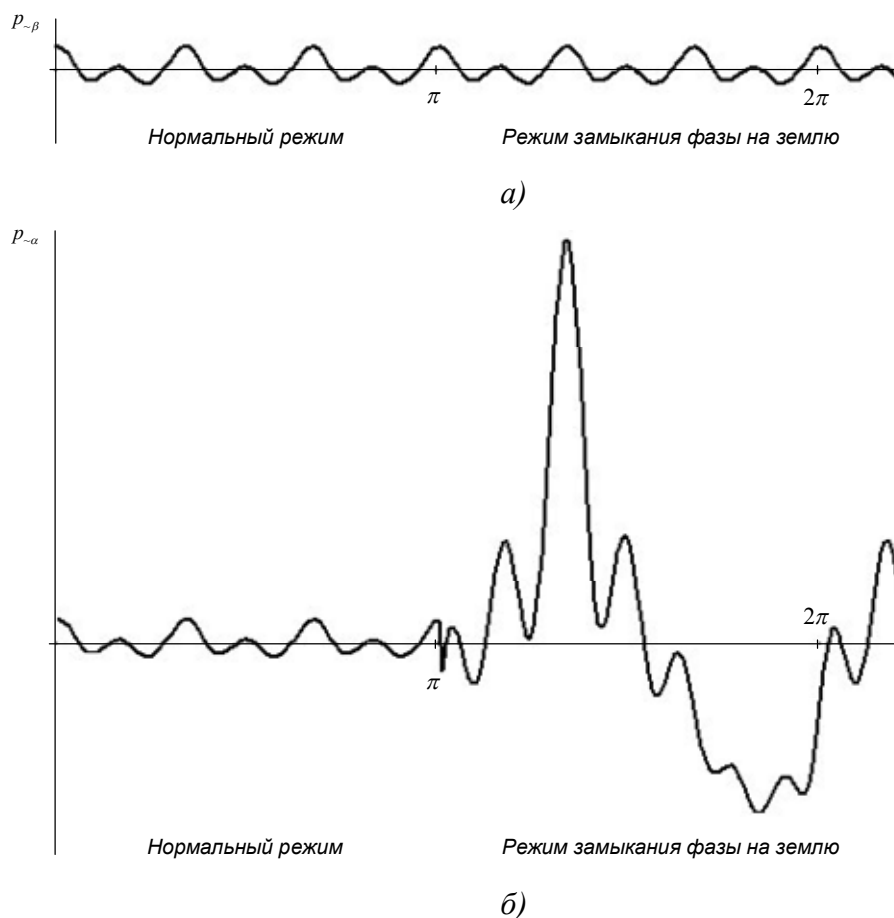


Рис. 10. Мгновенные значения переменной составляющей мощности при несинусоидальных напряжениях источника питания:
а) на неповрежденной линии; б) на поврежденной линии.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что при наличии в сети возможной несимметрии и несинусоидальности напряжений и токов защита от ОЗЗ, основанная на контроле пульсирующей мощности, будет характеризоваться высокой чувствительностью и селективностью действия в сетях любой конфигурации.

В пятой главе приведены результаты исследований характеристик защиты от ОЗЗ, основанной на контроле пульсирующей мощности на физической модели сети. Разработаны практические рекомендации для технической проработки устройства защиты.

Физическая модель сети на лабораторном стенде содержала источник питания напряжением 380 В, три отходящие линии, управляемый коммутационный аппарат для создания режима ОЗЗ. Каждая из линий была представлена в виде активно-емкостных проводимостей на землю и содержала активно-индуктивную нагрузку с изолированной нейтралью. На стенде обеспечивалась возможность изменения величин проводимостей и величин нагрузок, а также изменения степени их несимметрии. На защищаемых линиях использовались по три датчика линейных токов. Для контроля напряжений источника питания и напряжения смещения нейтрали использовались датчики напряжений.

Функциональные схемы защит линий были реализованы на базе персонального компьютера. В качестве устройства связи с сетью использовано многофункциональное устрой-

ство сбора данных *PCI-6024E* фирмы *National Instruments*, выполненное в виде платы расширения на локальную шину *PCI* компьютера.

Для управления платой и реализации устройств защиты линий сети от ОЗЗ использовалась среда разработки лабораторных виртуальных приборов *LabVIEW*. Разработанная программа позволяла осуществлять все необходимые действия по сбору данных, их обработке в соответствии с алгоритмом работы защиты и анализу полученных результатов.

В ходе проведения эксперимента несимметрия напряжений источника по обратной последовательности составляла около 4%. При этом напряжения источника содержали ряд высших гармоник в широком частотном диапазоне (до 1 кГц). Наиболее заметными являлись 2, 4, 5, 7, 11 и 19 гармоники. В результирующем сигнале доля каждой из этих гармоник составляла 1÷2% от основной составляющей, а общий коэффициент искажения синусоидальности не превышал 7%.

На рис. 11 приведены осциллограммы основных величин, характеризующих работу блоков защиты на поврежденной линии α и неповрежденной линии β при симметричных нагрузках.

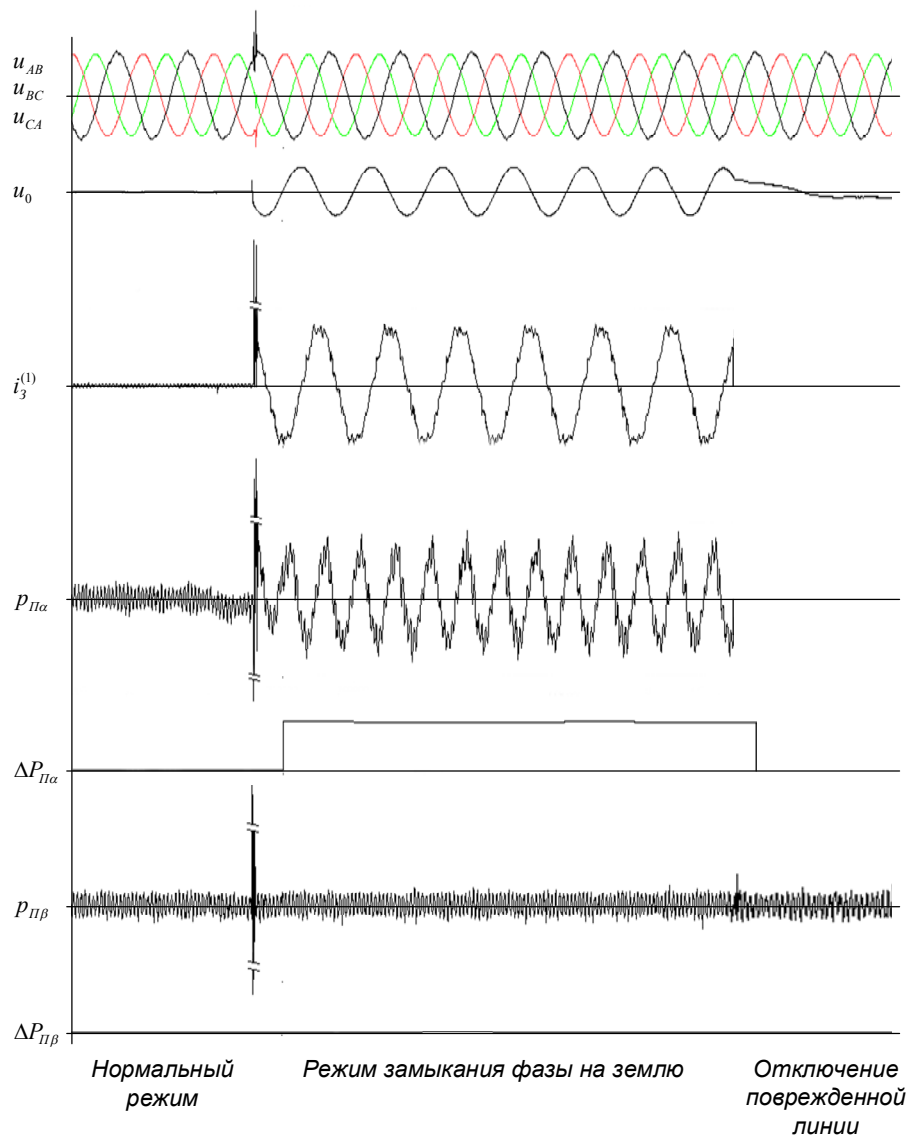


Рис. 11. Осциллограммы, характеризующие работу защиты.

Из осциллограмм видно, что в нормальном режиме работы сети (до возникновения ОЗЗ) на обеих линиях наблюдаются небольшие по величине переменные составляющие мгновенных мощностей $p_{\Pi\alpha}$ и $p_{\Pi\beta}$. Эти составляющие представляют собой результирующие сигналы в виде пульсирующей мощности частотой 100 Гц, обусловленной несимметрией напряжений источника питания и асимметрией проводимостей фаз линий на землю, и дополнительной высокочастотной составляющей, обусловленной высшими гармониками в сети.

В режиме ОЗЗ величина переменной составляющей мощности неповрежденной линии $p_{\Pi\beta}$ существенно не изменилась и зависит от тех же факторов, что и в нормальном режиме работы сети. Соотношение между действующим значением этой мощности при ОЗЗ в сети и аналогичным значением в нормальном режиме работы $P_{\Pi\beta}^{(1)}/P_{\Pi\beta} \approx 1,05$. Небольшое увеличение ($\approx 5\%$) объясняется некоторой несимметрией напряжений источника питания и асимметрией проводимостей фаз линии на землю.

На поврежденной линии из-за влияния общего для сети тока ОЗЗ наблюдается значительное увеличение переменной составляющей мощности $p_{\Pi\alpha}$ ($P_{\Pi\alpha}^{(1)}/P_{\Pi\alpha} \approx 4,13$). Соответственно, приращение мощности на поврежденной линии $\Delta P_{\Pi\alpha}$ имеет существенно большее значение по сравнению с приращением мощности на неповрежденной линии $\Delta P_{\Pi\beta}$, величина которого весьма незначительна. Соотношение величин выходных сигналов блоков защит линий, характеризующее чувствительность и селективность действия защиты, для случая, приведенного на рис. 11, $\Delta P_{\Pi\alpha}/\Delta P_{\Pi\beta} \approx 78$. Это свидетельствует о достаточно высоком качестве и избирательности работы защиты от ОЗЗ.

Аналогичные результаты были получены при проведении экспериментальных исследований с различными соотношениями величин токов нагрузок линий и тока замыкания на землю, при разной степени несимметрии нагрузок линий и различной асимметрии проводимостей линий на землю. Полученные результаты экспериментов подтвердили, что на основе нового принципа контроля возникновения ОЗЗ можно создать высокоэффективную защиту распределительных сетей 6-35 кВ от замыканий на землю.

На рис. 12 приведена структурная схема микропроцессорного устройства защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ, основанной на контроле пульсирующей мощности.

Устройство предназначено для защиты одной или нескольких отходящих от секции шин присоединений и состоит из следующих основных функциональных блоков: 1 – блок аналоговых входов; 2 – блок дискретных входов; 3 – цепи выборки и запоминания; 4 – мультиплексор; 5 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 6 – микропроцессор (МП); 7 – оперативное запоминающее устройство (ОЗУ); 8 – постоянное запоминающее устройство (ПЗУ); 9 – блок управления; 10 – системный интерфейс; 11 – блок логических входов / выходов; 12 – блок выходных реле.

Блок аналоговых входов служит для ввода сигналов от измерительных трансформаторов напряжения и трансформаторов тока. Этот блок представляет собой набор промежуточных трансформаторов напряжения и тока (ПТН и ПТТ) и обеспечивает согласование уровня входных сигналов с внутренними цепями устройства, а также гальваническое разделение входных цепей.

В цепях напряжения три входа используются для ввода линейных напряжений источника (входы u_{AB} , u_{BC} , u_{CA}), а четвертый вход – для ввода напряжения нулевой последовательности сети (вход $3u_0$).

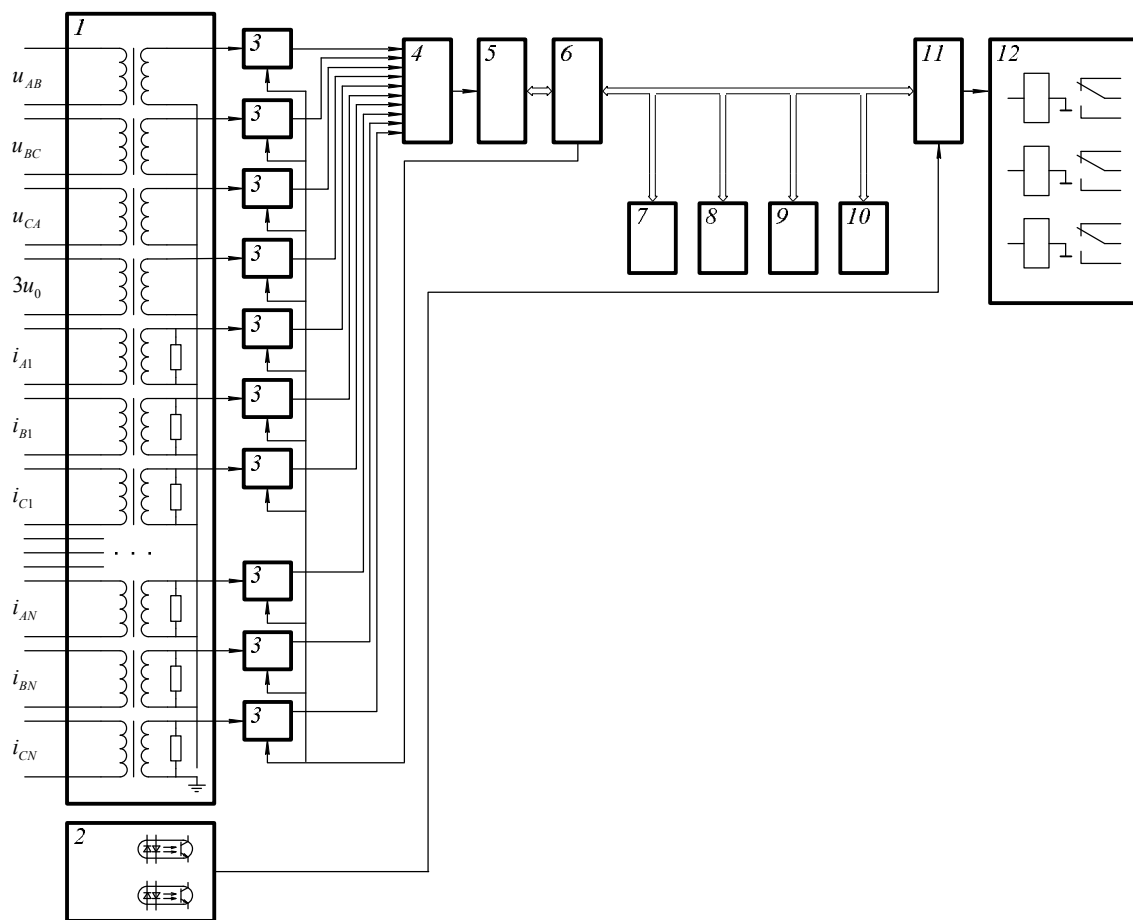


Рис. 12. Структурная схема защиты от ОЗЗ, основанной на контроле пульсирующей мощности.

Входные токовые цепи предназначены для ввода трех фазных токов каждого защищаемого присоединения (входы i_{A1} , i_{B1} , i_{C1} ... i_{AN} , i_{BN} , i_{CN} , где $1 \dots N$ – номер защищаемого присоединения).

Для преобразования сигнала с входных аналоговых цепей в цифровой код служит цифровой измерительный орган защиты, включающий: АЦП, мультиплексор для переключения каналов АЦП и устройства выборки и хранения для удержания постоянного уровня входного сигнала в течение времени преобразования.

Необходимо учесть, что в реальных условиях высокочастотные составляющие напряжений и токов при ОЗЗ в сети зависят от многих факторов и, как правило, имеют случайный характер. Таким образом, чтобы избежать искажения преобразованных сигналов в результате наложения спектров, в устройстве защиты целесообразно предусмотреть фильтр высокочастотных составляющих.

Блок дискретных входов предназначен для ввода в устройство вспомогательной логической информации, которая может использоваться в функционально-логической части

защиты: сигналы о состоянии вспомогательных контактов выключателей, сигналы от других устройств РЗА, сигналы разрешения / запрета действия защиты и др.

Работой вычислительно-логической системы устройства защиты управляет модуль микроконтроллера, содержащий в общем случае: универсальный МП, ОЗУ, ПЗУ, интерфейсы местной связи и связи с верхним уровнем АСУ ТП, сторожевой таймер для функции самодиагностики устройства.

Для управления подключенным оборудованием (выключателями защищаемых линий) и цепей сигнализации служит блок выходных силовых и сигнальных реле, обладающих достаточно высокой коммутирующей способностью.

Разработана методика расчета уставок защиты, приведены результаты оценки чувствительности.

Как было отмечено выше, функционирование защиты возможно по двум вариантам: по принципу «абсолютного» замера и по принципу «относительного» замера.

В случае, когда исполнительный орган защиты выполнен по принципу «абсолютного» замера уставка защиты выбирается из условия отстройки от максимального приращения пульсирующей мощности линии $\Delta P_{П.МАХ}$, обусловленного возможной несимметрией напряжений источника питания и возможной асимметрией проводимостей фаз линии на землю

$$\Delta P_{CP.3} \geq K_{ОТС} \Delta P_{П.МАХ}, \quad (12)$$

где $K_{ОТС} = 1,5 \div 2$ - коэффициент отстройки.

Величину приращения $\Delta P_{П.МАХ}$ можно определить из выражения

$$\Delta P_{П.МАХ} = \frac{U_{Л}^2}{\sqrt{3}} \omega C_{\Sigma} \sigma m (\varepsilon_{U2} + 1) = 1,8 U_{Л}^2 \omega C_{\phi \Sigma} \sigma m, \quad (13)$$

где $U_{Л}$ - линейное напряжение источника питания; $C_{\phi \Sigma}$ - суммарная емкость фазы сети на землю; σ - показатель асимметрии линии ($\sigma = 0,001 \div 0,003$ - для кабельной линии, $\sigma = 0,02 \div 0,05$ - для воздушной линии); $\varepsilon_{U2} = 0,04$ - показатель несимметрии напряжений источника питания; m - показатель, характеризующий долю собственной емкости линии в общей емкости сети.

Наиболее простым алгоритмом с точки зрения отстройки защиты от сигналов помех на неповрежденных линиях, обусловленных возможной несимметрией в сети, является принцип «относительного» замера. В этом случае условие для селективного выявления поврежденной линии в сети можно записать в виде

$$\Delta P_{\alpha} > K_{ОТС} \Delta P_{\beta i}, \quad (14)$$

где ΔP_{α} - приращение пульсирующей мощности на поврежденной линии, как полезный для функционирования защиты сигнал; $\Delta P_{\beta i}$ - приращение пульсирующей мощности на любой i -ой неповрежденной линии, как сигнал помехи для функционирования защиты.

Результаты проведенных исследований показали, что условие (14) надежно выполняется при любых конфигурациях распределительной сети. Коэффициент чувствительности защиты значительно выше нормируемого, т.е. защита обладает достаточно высокой чувствительностью и позволяет селективно определить поврежденную линию в сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие результаты.

1. Аналитически обоснован новый способ защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ, основанный на контроле изменений пульсирующей мощности. Установлено, что при возникновении в сети ОЗЗ изменение (приращение) пульсирующей мощности на любой неповрежденной линии равно нулю, на поврежденной линии приращение пульсирующей мощности пропорционально величине общего для сети тока ОЗЗ. Это является важным признаком для достоверной идентификации повреждения при возникновении в сети ОЗЗ.
2. Разработаны алгоритм работы и функциональная схема защиты от ОЗЗ, основанной на контроле изменений пульсирующей мощности линий, при двух возможных вариантах функционирования исполнительного органа защиты:
 - по принципу «абсолютного замера» контролируемого приращения;
 - по принципу «относительного замера» контролируемого приращения.
3. Разработана математическая модель распределительной сети применительно к различным вариантам заземления нейтрали. Модель адекватно отражает процессы в сети в режиме замыкания на землю и позволяет учитывать основные факторы, определяющие характер и закономерности изменения пульсирующей мощности защищаемых линий.
4. Установлено, что на величину контролируемого приращения пульсирующей мощности оказывают влияние факторы несимметрии и несинусоидальности напряжений источника питания, асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю. Путем математического моделирования проведено исследование и сделана оценка влияния этих факторов на успешность функционирования защиты применительно к сетям с различными вариантами заземления нейтрали.
5. Проведена экспериментальная проверка работоспособности предложенного алгоритма защиты на физической модели распределительной сети. Результаты исследований подтверждают основные выводы, сделанные при математическом моделировании, и позволяют считать, что на основе нового принципа контроля возникновения ОЗЗ можно создать высокоэффективную защиту для распределительных сетей 6-35 кВ.
6. Разработаны практические рекомендации по технической проработке реализации структурно-функциональной схемы защиты и созданию опытного образца для промышленных испытаний и внедрения. Предложена методика расчета уставок и оценки чувствительности защиты.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в следующих работах:

научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Сапунков М.Л., Худяков А.А., Барский Г.А. Оценка влияния несинусоидальности напряжений источника питания на селективность защиты от однофазных замыканий на землю, основанной на контроле пульсирующей мощности // *Электротехника*. – 2010. – №12. – С. 47-53.
2. Худяков А.А., Сапунков М.Л. Влияние асимметрии проводимостей фаз линий на землю в сетях 6-10 кВ на селективность определения поврежденной линии при однофазных замыканиях // *Электротехника*. – 2011. – №5. – С. 2-5.
3. Сапунков М.Л., Худяков А.А. Аналитическое обоснование нового способа защиты трехфазных сетей от однофазных замыканий на землю // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2008. – №8. – С. 109-111.

научные публикации в других изданиях

4. Сапунков М.Л., Худяков А.А. К вопросу оценки несимметрии трехфазных систем // Вестник ПГТУ. Нефтегазовое и горное дело. – 2007. – Вып.7. – С. 241-247.
5. Сапунков М.Л., Худяков А.А. Защита от однофазных замыканий на землю, основанная на контроле пульсирующей мощности // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: матер. всерос. конф., Уфа, 2007 г. – Уфа, 2007. – С. 40-41.
6. Сапунков М.Л., Козлов А.С., Худяков А.А. Исследование работоспособности защиты от однофазных замыканий на землю в рудничной схеме электроснабжения // Научные исследования и инновации. – 2008. – Т.2, №4. – С. 98-102.
7. Худяков А.А., Сапунков М.Л. Разработка обобщенной модели распределительной сети 6-10 кВ для исследования нового способа защиты от однофазных замыканий на землю // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т.4, №1. – С. 133-138.
8. Худяков А.А., Сапунков М.Л. Исследование влияния асимметрии проводимостей фаз линий на землю на функционирование защиты от однофазных замыканий на землю // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т.4, №2. – С. 79-85.
9. Сапунков М.Л., Худяков А.А. Разработка селективной защиты от однофазных замыканий на землю для распределительных сетей 6-10 кВ // Энергетика. Инновационные направления в энергетике: матер. III всерос. науч. техн. конф., Пермь, 3-4 дек. 2009 г. – Пермь, 2010. – С. 85-91.
10. Худяков А.А., Сапунков М.Л. Обоснование возможности функционирования защиты от замыканий на землю, основанной на контроле пульсирующей мощности при дуговых перемежающихся замыканиях // Федоровские чтения: матер. XL всерос. науч.-техн. конф., М., 16-19 нояб. 2010 г. – М., 2010. – С. 152-153.
11. Сапунков М.Л., Худяков А.А. Исследование на физической модели распределительной сети характеристик защиты от однофазных замыканий на землю, основанной на контроле пульсирующей мощности // Состояние и развитие электротехнологии (XVI Бенардосовские чтения): матер. Междунар. Науч.-техн. конф., Иваново, 1-3 июня 2011 г. – Иваново, 2011. – С. 302-305.

патенты

12. Устройство защиты трехфазной сети от однофазных замыканий на землю: патент на полезную модель 103039 Рос. Федерация / Сапунков М.Л., Сапунков Л.М., Худяков А.А. № 2010139666/07; заявл. 27.09.2010; опубл. 20.03.2011. Бюл. № 8 – 2 с.

Подписано в печать 22.05.2012. Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 1,0
Формат 60×90/16. Набор компьютерный. Заказ № 1449/2012.

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.