



Некоммерческое партнерство
**«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ
Единой энергетической системы»**



Основана в 1724 году

Российская Академия Наук
Научный совет РАН по системным
исследованиям в энергетике

УТВЕРЖДАЮ

Президент НП «НТС ЕЭС»,
д.т.н., профессор

Н. Д. Рогалев

ПРОТОКОЛ

совместного заседания Научно-технического совета НП «НТС ЕЭС»,
секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные
энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в
энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике
на тему: **«Методы формирования логической части устройств РЗА в
электрических сетях с распределенной генерацией на основе машинного
обучения»**

30 мая 2022

№ 1/22

г. Москва

Заседание подготовлено секцией «Активные системы распределения
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС»
(председатель Секции д.т.н. **Илюшин П.В.**)

Присутствовали: члены Научно-технического совета НП «НТС ЕЭС»,
члены секции «Активные системы распределения электроэнергии и
распределенные энергетические ресурсы», АО «СО ЕЭС», ПАО «Россети»,
ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», АО «НТЦ ФСК ЕЭС», НИК С6 РНК СИГРЭ, ФГБУН
«ИНЭИ РАН», ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», ФГБУН «ИРФЭ ОНЦ СО РАН»,
Комитета ВИЭ РосСНИО, ГБОУ ВО «Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет», ИСЭиЭПС ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», ФГАОУ
ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
Общевойсковой академии ВС РФ, ФГБОУ ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е.
Алексеева», ФГАОУ ВО «УрФУ», ФГБОУ ВО «Южно-Российский
государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова»,
ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет», ФГБОУ ВО «Астраханский

государственный университет», ФГБОУ ВО «Севастопольский государственный университет», филиал ООО «Энерго-Юг» – «Южэнергосетьпроект», ООО НПП «ЭКРА», ООО «РТСофт-СГ», всего 54 человека.

Со вступительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» (АСРЭ и РЭР) НП «НТС ЕЭС», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н. **Илюшин П.В.**

Во вступительном слове Илюшин П.В. отметил, что тематика доклада является актуальной, так как объемы распределенной генерации, интегрируемой в распределительные сети или сети электроснабжения промышленных предприятий, ежегодно растут. Учитывая это, в ряде случаев возникают трудности с обеспечением чувствительности, селективности и быстродействия устройств РЗА, находящихся в эксплуатации. Это требует совершенствования пусковых органов устройств РЗА, а также их логической части. Данная проблематика в настоящее время не является всеобъемлющей, однако для своевременного решения возникающих вопросов в перспективе, необходимо уже сейчас начать отработку алгоритмов, изготовить образцы новых устройств РЗА и организовать их опытно-промышленную и промышленную эксплуатацию.

С докладом **«Методы формирования логической части устройств РЗА в электрических сетях с распределенной генерацией на основе машинного обучения»** выступил **Лоскутов А.А.**, к.т.н., доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Доклад состоит из трех разделов, основные положения которых приведены ниже.

Раздел 1. Особенности работы устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) в сетях 6-35 кВ с источниками распределенной генерации (ИРГ) и концепция предполагаемого развития РЗА.

Раздел 2. Принципы формирования логической части устройств многопараметрической РЗА.

Раздел 3. Аппаратно-программная реализация многопараметрических устройств РЗА с применением компонентов промышленной автоматизации.

В разделе 1 рассмотрены известные особенности электроэнергетических систем (ЭЭС) с ИРГ, среди которых отмечается:

- изменение традиционного механизма «производство – передача – распределение – потребление» электроэнергии: выработка энергии начинает осуществляться, в том числе децентрализованно, в непосредственной близости от конечных потребителей;

- изменение характеристик электрических режимов ЭЭС: изменяются направления передачи потоков мощности в линиях электропередачи и понизительных трансформаторах; сетевые элементы начинают работать в условиях многостороннего питания; изменяются уровни и распределение токов короткого замыкания; появляется возможность возникновения режимов качаний и асинхронных режимов;

– изменение значимости распределительных сетей: подобно энергосистеме они начинают выполнять нехарактерные для них ранее функции генерирования энергии и управления распределением потоков мощности;

– увеличение разнообразия применяемых технологий генерирования (газотурбинные и газопоршневые установки, ветровые и солнечные системы и др.).

Проанализировано влияние ИРГ на сети 6-10 кВ, 35 кВ, 110-220 кВ с позиции РЗА, представлено на рис. 1.

Вид сети	Традиционная конфигурация	Тип заземления нейтрали	Типы РЗА	Основные отечественные производители	Влияние ИРГ
6...10 кВ	Радиальная, одностороннее питание, разомкнутый режим	Изолированная, компенсированная, через резистор	1) Защита от межфазных КЗ: МТЗ, ТО (ступени); 2) Защита от ОЗЗ – «на сигнал»; 3) Контроль высших гармоник (редко).	ООО НПП "ЭКРА"  ООО «Прософт-Системы»  АО «РАДИУС Автоматика» 	- увеличение/снижение токов КЗ; - снижение эффективности (чувствительности) защит дальнего резервирования; - двухстороннее питание: изменение параметров срабатывания; - необходимость «направленной» защиты; - защита от ОЗЗ – без изменений; - необходимость обеспечения быстродействия защит (динамическая устойчивость).
35 кВ	Радиальная, кольцевая с одним ИП, одностороннее/двухстороннее питание		1) Защита от межфазных КЗ: -ступенчатые токовые РЗ; -дистанционные; 2) Направленные защиты; 3) Защита от ОЗЗ	ООО "Релематика"  ООО "НТЦ "Механотроника" 	- снижение чувствительности РЗ в режиме дальнего резервирования; - возможность возникновения синхронных качаний, асинхронных режимов; - необходимость обеспечения быстродействия защит.
110 – 220 кВ	Радиальная, кольцевая, одностороннее/двухстороннее питание, сложноразомкнутая	Эффективно заземленная нейтраль	<u>Одностороннее питание:</u> 1) Защита от межфазных КЗ: -ступенчатые токовые РЗ; -дистанционные; <u>Двухстороннее питание:</u> 2) Направленные защиты: -дистанционные (3 ст); -ТО; 3) Защита от однофазных КЗ: -ступенчатая ТЗНП (направленная)	ООО "НПП Микропроцессорные технологии"  АО "ЧЭАЗ"  ООО НПП "АЛИМП" 	- влияние на резервные ступени токовых и дистанционных защит; - влияние ИРГ на стороне 6-10кВ – незначительно; - необходимость обеспечения быстродействия защит; - увеличение частоты скольжения при асинхронном режиме.

Рис. 1. Влияние ИРГ на функционирование распределительных сетей.

Проведен анализ отечественного и зарубежного опыта решения задач РЗА при внедрении ИРГ.

Отечественный практический опыт создания и эксплуатации релейной защиты в системах электроснабжения с ИРГ получен на крупных промышленных предприятиях, объектах нефтегазовой отрасли. Рассмотрены особенности выполнения защит: необходимость быстрого отключения близких к шинам ИРГ коротких замыканий с целью предотвращения нарушений устойчивости генераторов; невозможность применения (в явном виде) логической защиты шин (ЛЗШ), получившей широкое распространение в распределительных сетях. Предложены рекомендации, общей целью которых являлось обеспечение условий для сохранения работы ИРГ на местную нагрузку. В настоящее время при оснащение генерирующих установок (ГУ) стандартизированным набором защит, определяемым заводом-изготовителем, приводит к несогласованности с защитами прилегающей сети, что способствует избыточным отключениям ГУ и отказам защит. Влияние ИРГ на защиты внешней сети рассматривается в недостаточной степени. В связи с этим на основе типовых рекомендаций не может быть выработан

комплексный подход к развитию системы релейной защиты (РЗ) в условиях увеличения масштабов внедрения ИРГ. Зарубежными специалистами подчёркивается, что РЗ преимущественно строится по принципу формального переноса и упрощения решений, уже получивших распространение в питающих и системообразующих сетях, что приводит к ряду потенциальных и фактических проблем. Отмечается два основных направления совершенствования РЗА: обеспечение требуемой эффективности функционирования РЗА электрических сетей, прилегающих к точке присоединения ИРГ; построение эффективной РЗА, устанавливаемой в узле присоединения ИРГ к электрической сети. Особую важность в работе РЗА в энергорайонах с ИРГ имеют такие требования как быстродействие, чувствительность (распознаваемость режима) и селективность.

На рис. 2 представлена возможная поэтапная концептуальная эволюцию устройств РЗА в ближайшей и отдаленной перспективе, где этапность развития зависит от готовности эксплуатирующих организаций, сетевой инфраструктуры и нормативно-технической базы.

	Текущая ситуация	1 этап (начальный)	2 этап	3 этап	4 этап
Основная РЗ	МТЗ, дист. РЗ	Переход на продольную диф. РЗ с каналом связи по МЭК 61850 (линий, шин, тр-ров, ...) <u>Достигаемые цели:</u> переход на ДифЗ резко увеличивает быстродействие и чувствительность основной РЗ, динамическую устойчивость нагрузок и генераторов	Переход на дифференциально-логическую РЗ с каналом связи по МЭК 61850 <u>Достигаемые цели:</u> автоматически конфигурируемая и адаптируемая основная защита всей сети; резервирование распознаваемых отказов выключателей, ТТ, устройств РЗ будет выполняться также дифференциальной защитой	Переход на полностью автоматически функционирующая система РЗ Plug&Play <u>Достигаемые цели:</u> экономия на квалифицированном персонале за счет автопараметрирования устройств РЗ и адаптации системы РЗ при сменах режимов и конфигураций сети; повышение надежности электроснабжения потребителей за счет увеличения технического совершенства РЗ	Переход на полностью автоматическую систему управления режимами сети с учетом затрат и ущерба потребителей и энергокомпаний <u>Достигаемая цель:</u> принятие оптимальных решений по управлению режимами по критерию минимума затрат и ущерба
Резервная РЗ	МТЗ, дист. РЗ	Переход на <u>многопараметрическую защиту</u> относительной селективности с универсальным многомерным пусковым органом на основе сеточных функций <u>Достигаемые цели:</u> значительное увеличение чувствительности и быстродействия резервной РЗ за счет применения наиболее информативных признаков режима и динамического изменения пускового органа. Адаптация устройств защиты к отказам отдельных ТТ, ТН			
Автоматический расчет уставок РЗ (АРЗ)	Нет	<u>Автоматический расчет уставок МТЗ, ДЗ, многопараметрической защиты в темпе управления процессами</u> <u>Достигаемые цели:</u> увеличение чувствительности и быстродействия резервной РЗ за счет быстрой <u>адаптации</u> МТЗ к новой конфигурации и режиму сети; устранение человеческих ошибок			

Рис. 2. Возможные перспективы развития устройств РЗА с ИРГ.

Указанное этапное развитие ведет к реализации в устройствах РЗ технологии *plug and play* (автоматическое параметрирование нового оборудования РЗ, подключенного к электрической сети) и самоадаптации системы РЗ в процессе развития распределительной электрической сети.

Адаптация настроек может означать или постоянную адаптацию алгоритмов защиты, в соответствии с требуемыми функциями, или адаптацию параметров срабатывания (уставок) РЗ. Однако, чем больше ИРГ входит в состав распределительной сети, тем сложнее становится параметризация системы защиты, поскольку значения токов короткого замыкания (КЗ) существенным образом

меняются. При этом существуют два способа реализации: расчет параметров в режиме online динамически, в соответствии с текущей электрической моделью распределительной сети и предварительный расчет параметров защиты в режиме offline, с последующим определением таблицы возможных случаев.

Для безусловного обеспечения селективности систему РЗ перспективной интеллектуальной распределительной электрической сети с ИРГ предлагается выполнять с двумя независимыми уровнями, соответствующими традиционному взгляду на РЗ:

Уровень 1 – быстродействующие защиты абсолютной селективности для каждого участка сети (зоны защиты), не имеющие резервной зоны защиты. Селективность таких защит обеспечивается настройкой срабатывания только в их основной зоне защиты.

Уровень 2 – ступенчатые защиты относительной селективности для каждого участка сети (зоны защиты), имеющие резервные зоны защиты. Селективность таких защит обеспечивается отстройкой по времени по ступенчатому принципу.

Предположим, что на всех присоединениях электрической сети установлены интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ), и они связаны единой информационной сетью по МЭК 61850. Один из вариантов защит первого и второго уровней может быть таким:

- первый уровень включает дифференциально-логическую защиту с использованием сети связи по МЭК 61850. Защита построена на распределенных ИЭУ всех присоединений электрической сети. При этом все ИЭУ, реализующие дифференциально-логическую РЗ, активно взаимодействуют друг с другом во всех зонах защиты, адаптируясь под топологию сети, ее режимы, в том числе при отказах элементов;

- на втором уровне используются многопараметрические защиты, основанные на статистических принципах и синтезированной логической частью. Защита отличается от существующих защит пусковым органом, позволяющим достигать большей чувствительности РЗ за счет использования множества измерений и произвольным выбором измеряемых параметров режима, а также возможностью динамической адаптации к режимам работы сети (при наличии информационной сети по МЭК 61850).

Перспективность двухуровневого подхода в традиционных и новых алгоритмах защит заключается в: потенциально более высокой чувствительности (вероятности распознавания повреждений) за счет увеличения количества оцениваемых параметров и/или правильного выбора измеряемых величин; возможности одновременного применения в сети устройств защиты с различным набором параметров токов и напряжений, а также традиционных защит с любыми характеристиками; возможности автоматического расчета уставок и согласования РЗ для любого режима и конфигурации сети; потенциально повышенной надежности на уровне алгоритма устройств РЗ; преемственности, логической части с логической частью традиционных защит; возможности постоянной адаптации, дополнительного «обучения» защиты во время ее работы за счет накопления и учета реальной статистики по нормальным и аварийным режимам конкретного присоединения. Адаптация производится непрерывным

добавлением новой статистической информации в графики плотности вероятности для последующего изменения характеристик срабатывания.

Во втором разделе показаны основные принципы и инструменты формирования логической части устройств многопараметрической РЗА. Отмечено, что существующие алгоритмы устройств РЗА энергосистем не всегда удовлетворяют требованиям систем электроснабжения с ИРГ. Основные алгоритмы РЗА принципиально не изменились за последние десятилетия и, по сути, являются цифровыми аналогами защит на электромеханической элементной базе. Поэтому наблюдаются участвовавшие аварии на небольших электростанциях, излишние отключения энергетических установок, что влечет за собой ущербы для потребителей. В то же время современные микропроцессорные устройства РЗА с поддержкой МЭК 61850 позволяют иметь доступ к большому количеству информации о защищаемом или управляемом электроэнергетическом объекте в режиме online. Это создает предпосылки для построения современных энергосистем с устройствами РЗА нового поколения, работающих по новым алгоритмам. В частности, целесообразно развитие многопараметрических (многомерных) защит, как РЗ второго уровня, использующей нескольких информационных параметров. Например, модуль тока и напряжения, фазовый угол, активное и реактивное сопротивление, приращения отдельных параметров и др. Перспективен информационный подход, основанный на многократном моделировании и статистической обработке результатов моделирования. При этом целесообразно использование большого количества математических методов.

Целью исследования являются принципы построения многопараметрических релейных защит с объединением (синтезом) отдельных пусковых органов (ПО) и измерительных органов (ИО) через логическую часть РЗА с целью повышения надежности и распознаваемости нормальных и аварийных режимов работы с помощью совокупности методов, а также демонстрация их функционирования на простых прикладных примерах.

Задачей исследования является повышение параметров технического совершенствования устройств РЗА для сетей с ИРГ в зависимости от приоритета (быстродействие, чувствительность, надежность).

На рис. 3 показана классификация большого количества математических методов, работающих с данными и служащих для повышения эффективности работы энергосистем и РЗА. На рис. 3 выделена часть методов классификации режимов работы, рассматриваемая в докладе.

Первый подраздел второго раздела посвящен методам с использованием бинарной информации от пусковых органов (ПО). Первый метод основан на использовании статистических данных. Их получение в реальных условиях либо крайне проблематично, либо вообще невозможно, поэтому, как и предполагает информационный подход, предусматривается многократное имитационное моделирование нормальных и аварийных режимов сетей. Полученные результаты используются для создания и тестирования разработанных алгоритмов логики РЗА. В ходе исследования использовалась имитационная модель электрической сети, реализованная в программном комплексе *Matlab/Simulink* (рис. 4).

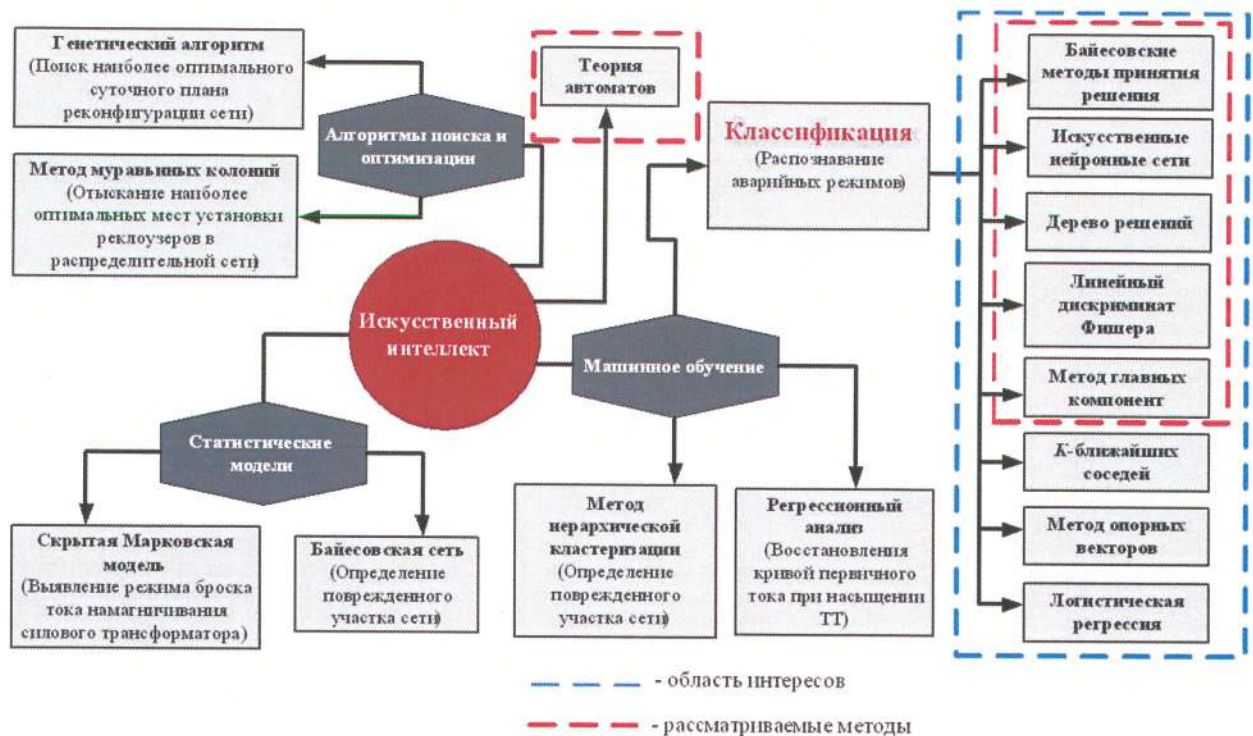


Рис. 3. Классификация математических методов искусственного интеллекта для электроэнергетики.

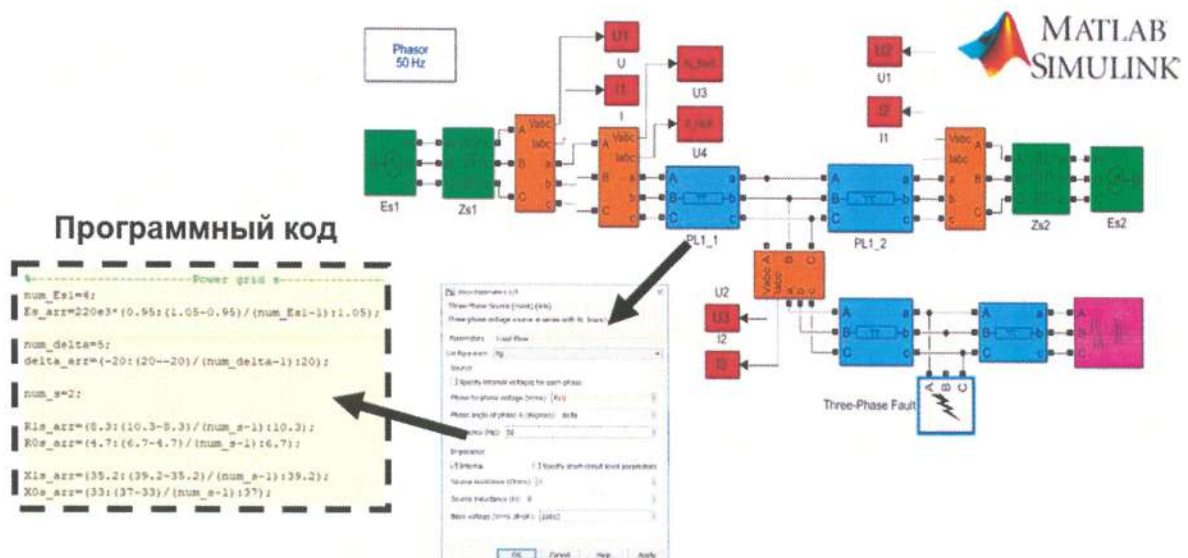


Рис. 4. Имитационная модель участка сети 110/220кВ в Matlab/Simulink.

Модель представляет собой три участка воздушной линии электропередачи (ВЛ), два источника питания и короткозамыкатель через переходное сопротивление в резервной зоне защиты. Накопление данных проводилось в месте установки защиты первого участка. Для получения требуемых статистических данных по режимам работы модели сети параметры элементов были разделены на фиксирование и интервальные, варьируемые в заданных диапазонах. При моделировании проводилось 10 000 итераций однофазных КЗ вдоль смежной ВЛ. Моделирование проведено с учетом пяти одномерных ПО: по модулю тока, по модулю напряжения, по фазе напряжения, по активной и реактивной мощности.

Представление полученной статистики по режимам возможно в виде графиков условной плотности вероятности, где горизонтальная ось – измеряемый признак (например, модуль тока) в нормальных и аварийных режимах в месте наблюдаемой РЗ (рис. 5). Для упрощения расчёта в примере проведена аппроксимация вероятности нормальным распределением.

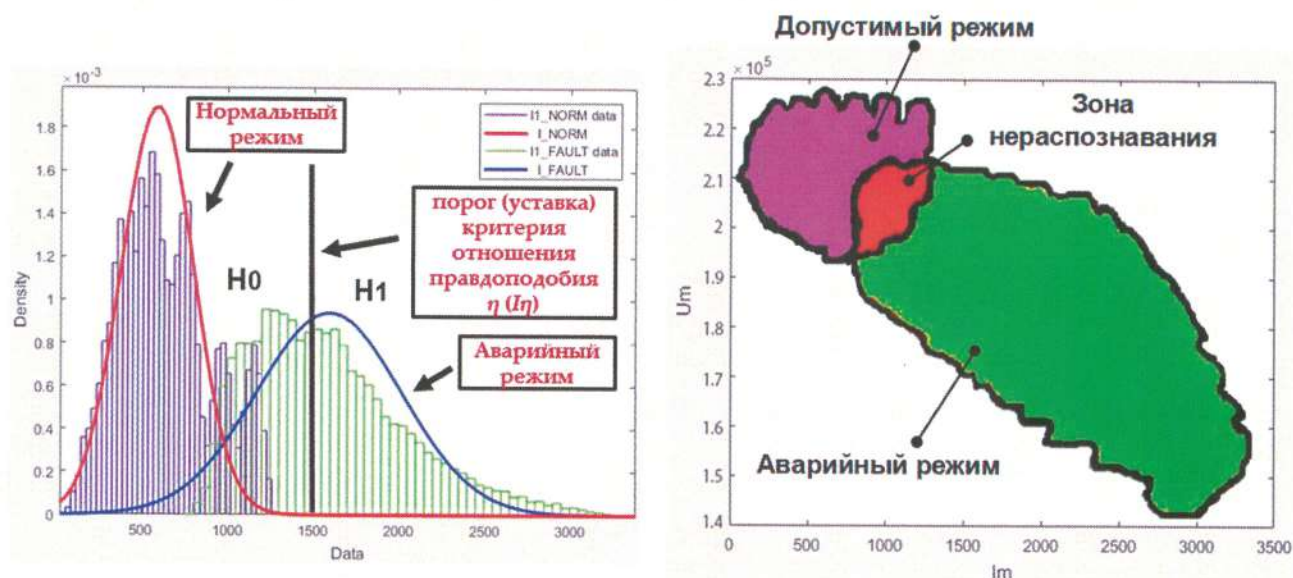


Рис. 5. Имитационная модель участка сети 110/220кВ в *Matlab/Simulink*.

Так же для примера на рис. 5 представлен график, где в уставочном пространстве РЗ существует область пересечения допустимых и аварийных режимов, что приводит к нераспознаваемости режима и усложнению принятия правильного решения.

Для каждого ПО были построены графики плотности вероятности распределения параметров при нормальном и аварийном режиме. Распознавание режима для каждого ПО производится решением двухгипотезной задачи или по критерию Байеса.

$$\lambda(P) = \frac{P_{H1}(p_i(t)|H_1)}{P_{H0}(p_i(t)|H_0)} \rightarrow \infty,$$

где $P_{H1}(p_i(t)|H_1)$ и $P_{H0}(p_i(t)|H_0)$ – функции плотности условной вероятности (правдоподобия) нормального и аварийного режима при заданном векторе наблюдения.

Байесовский критерий принятия решений позволяет обеспечить полную отстройку от всех допустимых режимов. При этом проверяются две гипотезы: если измерение попадает в область допустимых режимов, то принимается гипотеза H_0 ($\lambda(P) \leq \eta \rightarrow H_0$); если измерение попадает в область аварийных режимов (факт наличия КЗ), то принимается гипотеза H_1 ($\lambda(P) > \eta \rightarrow H_1$). Для каждого ПО были определены и проверены эти гипотезы и определены пороги срабатывания (η (для модуля тока $\eta = 1300$ А)). Результаты построения показывают, что распознавание аварии разными ПО отличается. Были определены вероятности срабатывания и несрабатывания различных ПО при КЗ. Для ПО1 по модулю тока она является самой высокой (почти 70%), в то время как для ПО3 по активной мощности низкой (всего 13%). Суммарный сигнал, получаемый от всех ПО и поступающий на вход

логической части защиты представляет собой фиксированную выборку (0 или 1), наблюдаемую в один и тот же момент времени: вектор A (рис. 6).

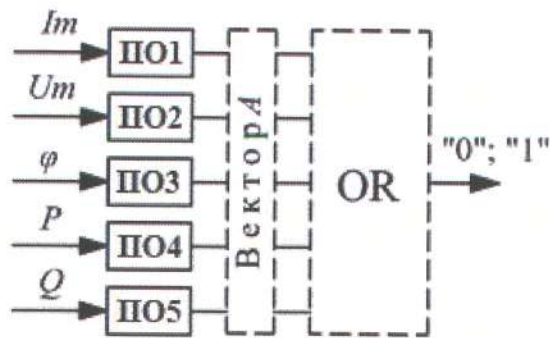


Рис. 6. Объединение вектора A логической операцией «ИЛИ».

Повысить чувствительность возможно за счет объединения логической операцией «ИЛИ» элементов вектора A (рис. 6). В этом случае защита сработает в случае распознавания аварийного режима хотя бы одним из ПО. Для оценки чувствительности использована объектная характеристика – зависимость величины переходного сопротивления от удаленности повреждения на ВЛ. На основе объектной характеристики можно установить при каких переходных сопротивлениях и удаленности от подстанции КЗ будет не распознано отдельными ПО и защитой в целом (рис. 7).



Рис. 7. Объектная характеристика распознавания.

По расчетам вероятность распознавания аварийных режимов увеличивается на 67,5% по отношению к ПО с самой низкой вероятностью срабатывания.

Возможно применение метода организации РЗ, основанного на применении методов булевой алгебры и теории автоматов. Логический орган (ЛО) организован из двух сегментов (рис. 8). В состав операций элементов первого сегмента входит логическое отрицание («НЕ») и логическое умножение («И»). Каждый логический элемент включает совокупность прямых и инверсных входов. Первый сегмент содержит $2^P - 1$ логических элементов, (т.е. 31, P -количество ПО). Логический элемент «И» со всеми инверсными входами отсутствует, т.к. входная комбинация

из одних нулей от ПО1-ПО5 существует только в нормальных режимах. Второй сегмент представлен одним логическим элементом «ИЛИ».

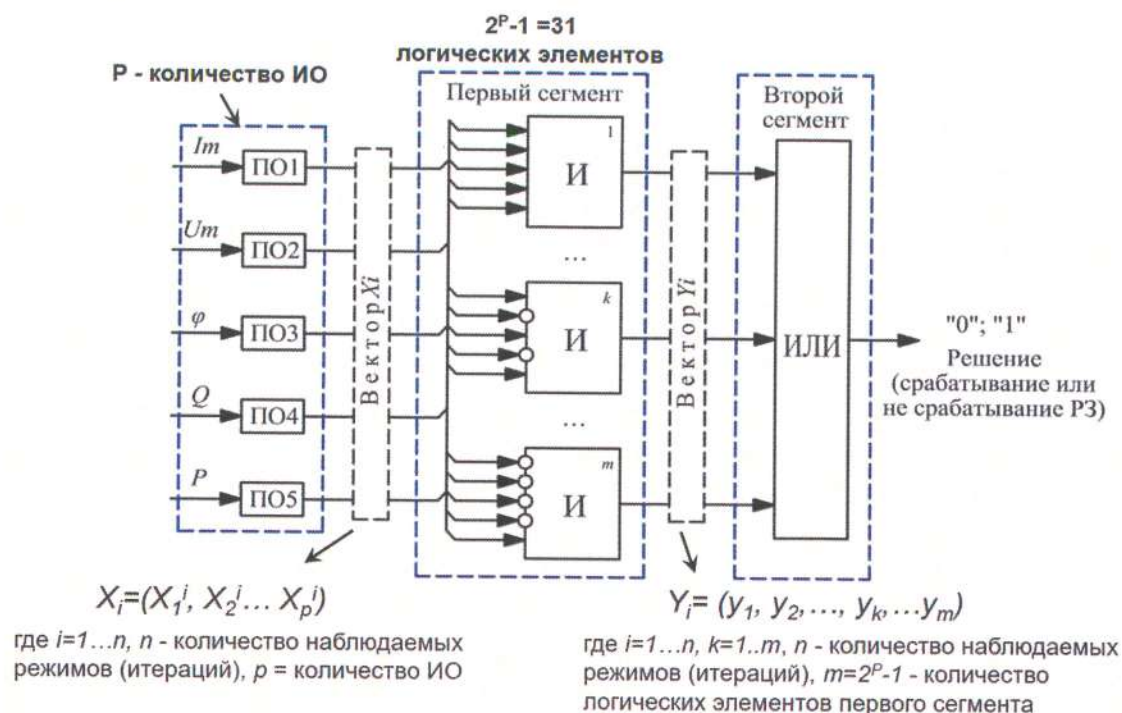


Рис. 8. Структурная схема логической части объединения сигналов ПО.

При каждой итерации от ПО формируется вектор X_i представляющий собой совокупность бинарных случайных величин (0 или 1). Соответствующие сигналы из выборки вектора X_i сначала будут инвертированы, а потом объединены (операция «И»). В итоге на выходе первого сегмента формируется вектор выходных сигналов Y_i . Выход автомата второго сегмента дает ожидаемый сигнал, необходимый для принятия решения — «1» или «0» (срабатывание или не срабатывание РЗ). Число возможных сочетаний бинарных сигналов ПО равно 2^P . Анализ работы логической части показал, что при такой организации логики РЗ срабатывание хотя бы одного измерительного органа, который отстроен от нормального режима, ведет к срабатыванию устройства РЗ. При этом чувствительность устройства РЗ будет определяться наибольшей чувствительностью из набора ПО1-ПО5. Рассмотренный пример логики многопараметрической РЗ с пятью ПО показал, что при применении разработанного метода объединения бинарных сигналов вероятность распознавания КЗ с переходным сопротивлением в резервной зоне РЗ увеличилась на 2-3% по сравнению с самым чувствительным измерительным органом.

Предложенный подход, повышающий чувствительность РЗ, ориентирован на функционирование РЗ в условиях абсолютной надежности отдельных ИО и ПО. На практике возможны отказы, связанные с потерей измерительных данных, выходом из строя измерительных преобразователей, задержкой в канале передачи данных, которые приводят к несрабатыванию РЗ в аварийном режиме или излишнему срабатыванию в нормальных режимах. Для организации логической части РЗ предлагается использование мажоритарного принципа на основе схем голосования с объединением логических сигналов вектора A (или X_i) по принципу «2 из 3-х».

Для этого используются три идентичных блока «ИЛИ», обеспечивающих избыточность обработки информации. Неустойчивая работа одного из логических элементов не влияет на функционирование РЗ в целом, что обеспечивает повышение надежности ее функционирования.

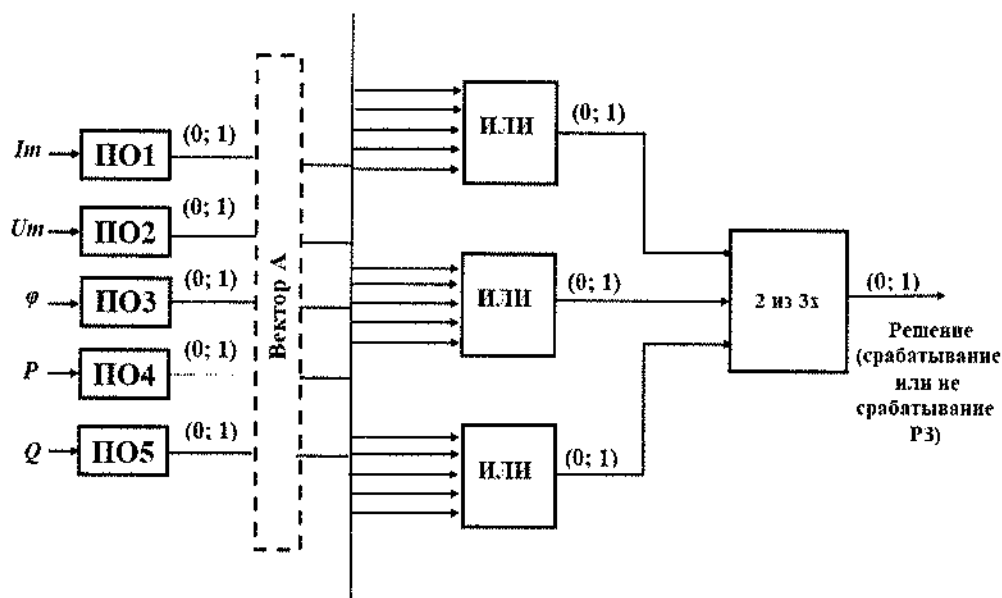


Рис. 9. Структурная схема организации логической части РЗ при объединении совокупности сигналов отдельных пусковых органов по принципу «2 из 3-х».

Для оценки надежности предложенной структуры была использована Марковская модель переходов из одного состояния к другому (рис. 10). Следует подчеркнуть, что оценка надежности была выполнена косвенно из-за того, что источником интенсивности отказов и восстановлений являются данные по оценке надежности специальных схем защит из опубликованной литературы. В таблице 1 отображены значения интенсивности отказов и восстановлений. Для такой модели идентифицируется пять состояний.

Таблица 1 – Значения интенсивности отказов и восстановлений

Параметры	Значения
λ_{00}	0,018 (один раз в 25 лет)
λ_{0H}	0,026 (один раз в 35 лет)
μ_{BO}	1095 (8 часов в год)
μ_{BH}	4 (тест 6 месяцев)

где λ_{00} – интенсивность отказов для обнаружения отказа логического элемента; λ_{0H} – интенсивность отказов для не обнаружения отказа логического элемента; μ_{BO} – интенсивность восстановлений для обнаружения отказа логического элемента в год; μ_{BH} – интенсивность восстановлений для не обнаруженного отказа логического элемента в год.

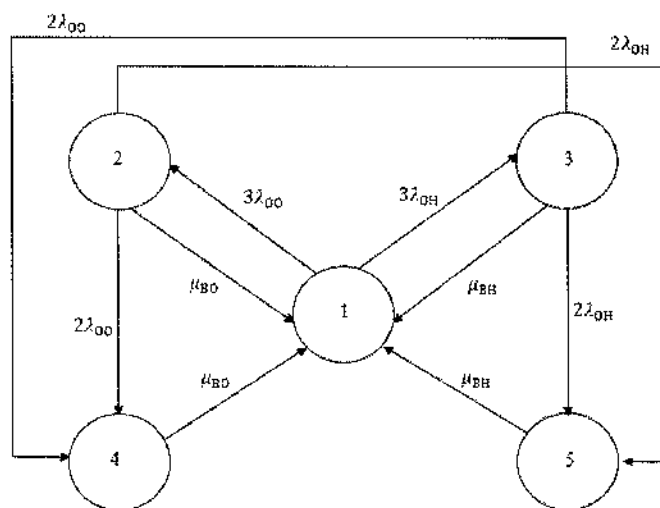


Рис. 10. Марковская модель состояния предложенной схемы организации логической части РЗ.

Для Марковской модели определение вероятностей каждого состояния $P_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) выполняется решением системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена. В теории случайных процессов доказано, что однородные Марковские процессы без поглощающих состояний (состояний, из которых нет выхода) имеют стационарный режим, который наступает при достаточно больших временах ($t \rightarrow \infty$). Поэтому получаем систему алгебраических уравнений для определения показателей надежности.

$$\begin{aligned} -(3\lambda_{00} + 3\lambda_{0H})P_1 + \mu_{B0}P_2 + \mu_{BH}P_3 + \mu_{B0}P_4 + \mu_{BH}P_5 &= 0; \\ -(2\lambda_{00} + 2\lambda_{0H} + \mu_{B0})P_2 + 3\lambda_{00}P_1 &= 0; \\ -(2\lambda_{00} + 2\lambda_{0H} + \mu_{BH})P_3 + 3\lambda_{0H}P_1 &= 0; \\ -\mu_{B0}P_4 + 2\lambda_{00}P_2 + 2\lambda_{00}P_3 &= 0; \\ -\mu_{BH}P_5 + 2\lambda_{0H}P_2 + 2\lambda_{0H}P_3 &= 0; \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 &= 1. \end{aligned}$$

Чтобы полученная система не была вырожденной, добавляется условие нормирования $\sum_{i=1}^n P_i$.

Далее, после суммированием 1-ого и последнего уравнений, получаем систему:

$$\begin{aligned} (1 - (3\lambda_{00} + 3\lambda_{0H}))P_1 + (1 + \mu_{B0})P_2 + (1 + \mu_{BH})P_3 + (1 + \mu_{B0})P_4 \\ + (1 + \mu_{BH})P_5 &= 1; \\ -(2\lambda_{00} + 2\lambda_{0H} + \mu_{B0})P_2 + 3\lambda_{00}P_1 &= 0; \\ -(2\lambda_{00} + 2\lambda_{0H} + \mu_{BH})P_3 + 3\lambda_{0H}P_1 &= 0; \\ -\mu_{B0}P_4 + 2\lambda_{00}P_2 + 2\lambda_{00}P_3 &= 0; \\ -\mu_{BH}P_5 + 2\lambda_{0H}P_2 + 2\lambda_{0H}P_3 &= 0. \end{aligned}$$

С учетом подстановки численных значений вероятности каждого состояния можно рассчитать:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.868 & 1096 & 5 & 1096 & 5 \\ 0.054 & -1095.088 & 0 & 0 & 0 \\ 0.078 & 0 & -4.06 & 0 & 0 \\ 0 & 0.036 & 0.02 & -1095 & 0 \\ 0 & 0.052 & 0.04 & 0 & -4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.981 \\ 4.8374 \cdot 10^{-5} \\ 0.0187 \\ 6.1696 \cdot 10^{-6} \\ 2.4396 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

Расчеты показывают, что при использовании принципа «2 из 3х» получается достаточно высокая надежность и РЗ будет работать в 98,1% случаях безотказно. С целью дополнительного увеличения надежности, не влияющей на достигнутую максимальную чувствительность, был применен принцип «1 из 2-х». Такой подход подразумевает избыточность системы логических элементов, объединенных принципом «2 из 3-х» и дополненный логикой «1 из 2-х». Такая организация логического органа приводит к вероятности правильной работы до 99,96%.

Повысить распознаваемость возможно за счет объединения элементов

вектора A искусственной нейронной сетью (ИНС). Целью ИНС является объединение бинарных сигналов входной выборки для правильной классификации нормальных и аварийных режимов. Для увеличения распознаваемости аварийных режимов использовано приложение *Neural Network Pattern Recognition (nprtool)* программного комплекса *Matlab*. На рис. 11 приведены принципы объединения бинарных сигналов, где элементы матрицы: (1,1) – допустимые распознанные ИНС режимы; (2,2) – аварийные распознанные ИНС режимы; (1,2) – режимы, которые считаются аварийными, но при обучении оказались нормальными (неправильное распознавание РЗ аварийных режимов); (2,1) – режимы, которые считаются допустимым, но при обучении оказались аварийным (неправильное распознавание РЗ нормальных режимов).

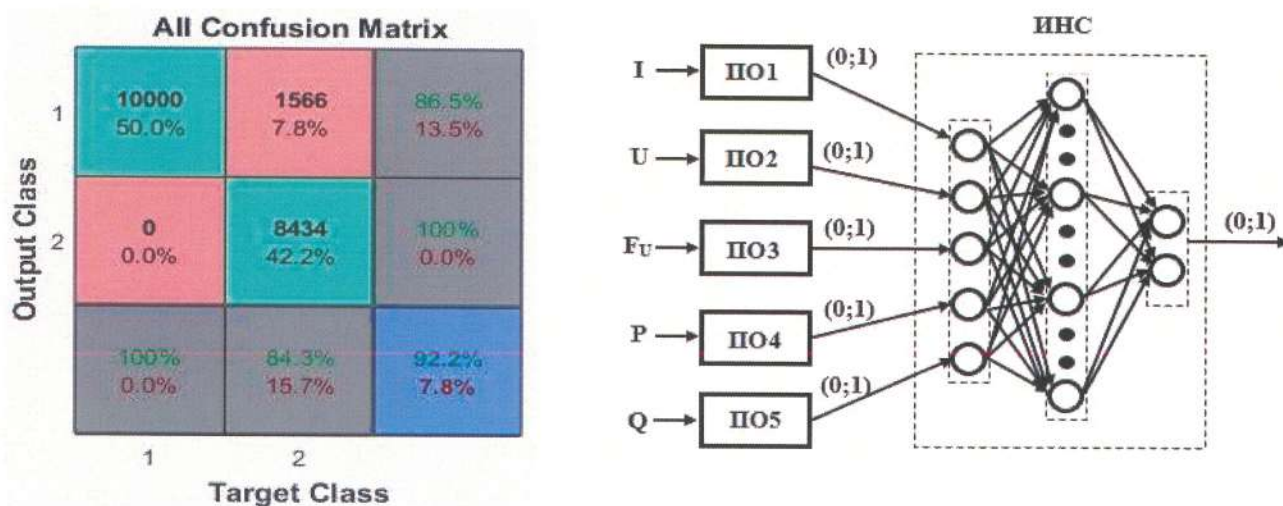


Рис. 11. Объединение бинарных сигналов от отдельных пусковых органов с помощью ИНС.

При обучении ИНС для требований РЗА использована простая структура с одним промежуточным слоем, обладающим десятью нейронами. Входной слой содержит пять нейронов, соответствующих каждому элементу выборки вектора A . Выходной слой содержит два нейрона (0 или 1) которые определяют распознаваемость и принимают решение о срабатывании или несрабатывании защиты. Для обучения ИНС использовалось 70% общей выборки, 15% использовалось для проверки, и еще 15% использовалось для валидации. Конечная матрица путаницы показывает (рис. 11), что нормальные режимы распознаны полностью, распознаваемость аварийных режимов повысилась и составила 84,34%, а нераспознанными остались 15,6% режимов.

Аналогичным образом была сделана попытка объединения бинарных сигналов внутри логического органа методом дерева решений (ДР) в приложении *Matlab*. Результаты получились аналогичными тем, которые были получены при использовании ИНС. Защита сработает правильно, а распознаваемость аварийных режимов будет обеспечена в 84,34% случаев.

Для повышения надежности многомерной РЗА рассмотрена комбинация метода ИНС и ДР с объединением сигналов по принципу «1 из 2-х», что дополнительно повышает надежность. По оценкам вероятность отказа системы при

объединении по принципу «1 из 2-х» составит $3,6 \cdot 10^{-5}$. Исходя из этого вероятность безотказной работы будет стремиться к 100%.

В следующем подразделе второго раздела доклада приводятся примеры методов, используемых для синтеза отдельных измерительных признаков, изменяющихся в режиме реального времени, и образующих области режимов работы – нормальных и аварийных.

В качестве еще одного метода для повышения чувствительности и распознаваемости режима предлагается переход к «обобщенному признаку» для срабатывания многопараметрических защит с несколькими измерительными органами. Под обобщенным признаком понимается выделение из множества признаков срабатывания (токов, напряжений, фаз, их производных, сопротивлений и др.) наиболее информативных параметров (обобщенного признака) за счет применения методов сжатия данных. Это упрощает процесс параметрирования уставок, который сводится к поиску данного обобщенного признака и сравнивает его с безразмерной уставкой в относительных величинах (рис. 12).

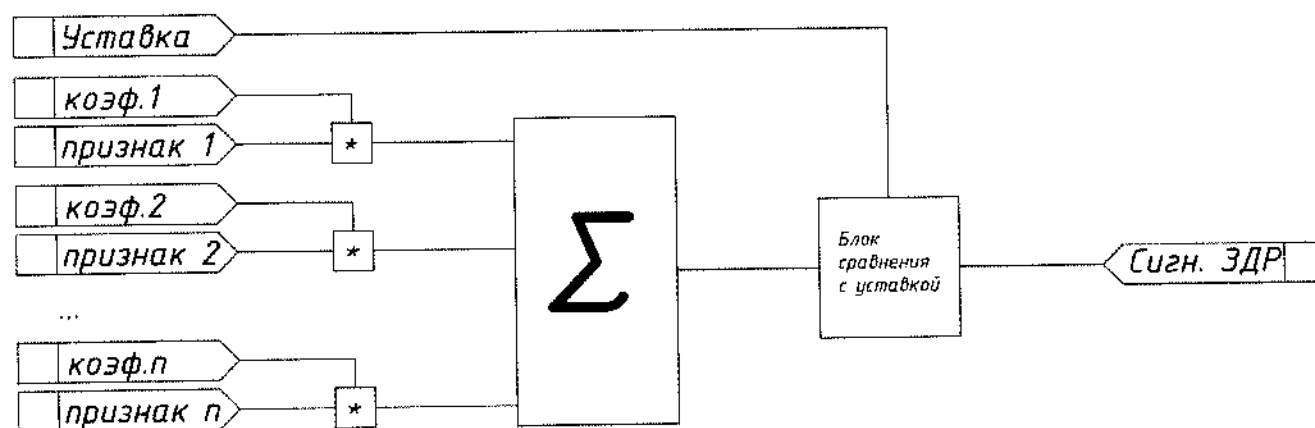


Рис. 12. Схема реализации применения обобщенного признака в защите дальнего резервирования.

Апробация данного метода была реализована на примере защит дальнего резервирования (ЗДР) – защит, установленных на смежных участках сети, как правило относительной селективности, действующих при отказе основных защит защищаемого элемента, в которых имеются проблемы с обеспечением чувствительности.

В качестве методов для перехода к обобщенному признаку были выбраны два наиболее простых метода: метод главных компонент (МГК) и линейный дискриминант Фишера (ЛДФ). Эти математические методы позволяют уменьшить размерность информации, извлечь максимум полезной информации из исходных данных, при этом сжав её в более удобного вида (рис. 13). Оба метода приводят к получению координат новых компонент в виде коэффициентов значимости для каждого исходного информативного параметра.

Указанные математические методы позволяют реализовать классификатор признаков, уменьшая их количество, при этом максимально использовать их информативность.

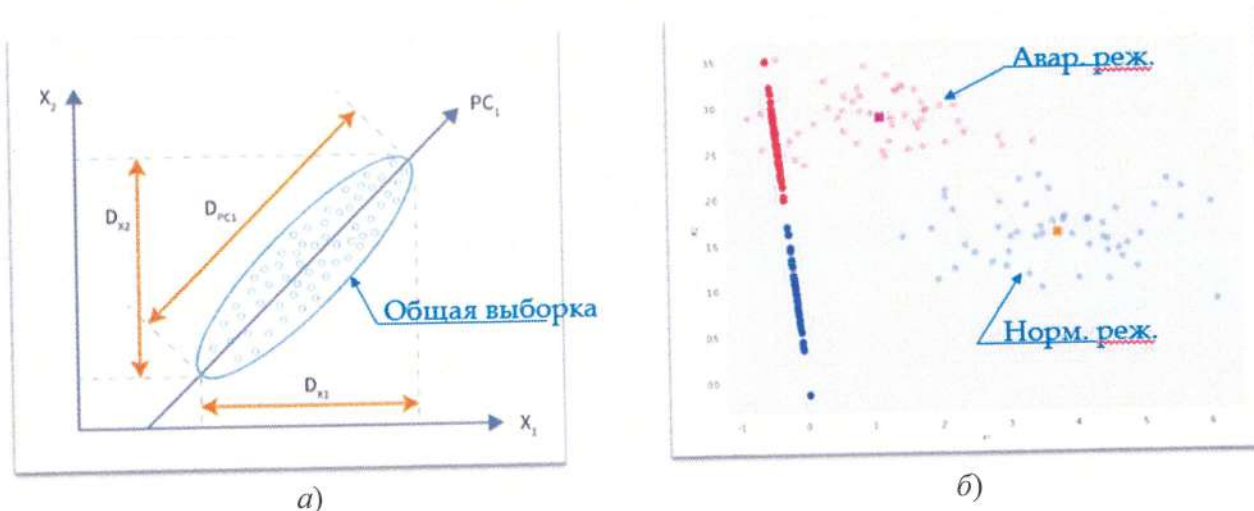


Рис. 13. Методы сжатия данных: а – метод главных компонент;
б – линейный дискриминант Фишера.

Применение вышеизложенных методов требует накопления статистических данных по выбранным для измерения параметрам для конкретной конфигурации сети, что необходимо для формирования обучающей выборки. Для иллюстрации подходы была создана PSCAD-модель с изменяющимися параметрами в различных схемно-режимных ситуациях (нормальные и аварийные режимы) для участка сети. По результатам моделирования было получено множество различных исходных признаков, которые можно использовать в алгоритмах сжатия данных. По результатам расчётов было установлено, что наиболее эффективными исходными параметрами, принимаемыми для расчёта новой компоненты, являются: приращение активного и реактивного тока (ΔI_a и ΔI_p), ток обратной последовательности (I_2), активное и реактивное сопротивление (R и X), значение фазы. Кроме того, анализ наиболее тяжелых случаев, с целью определения параметров и коэффициентов, положительно сказывается на распознаваемости и идентификации нормальных и аварийных режимов. Для анализа эффективности предложенных методов рассматривались различные варианты конфигурации сети, что позволило построить объектные характеристики (рис. 14).

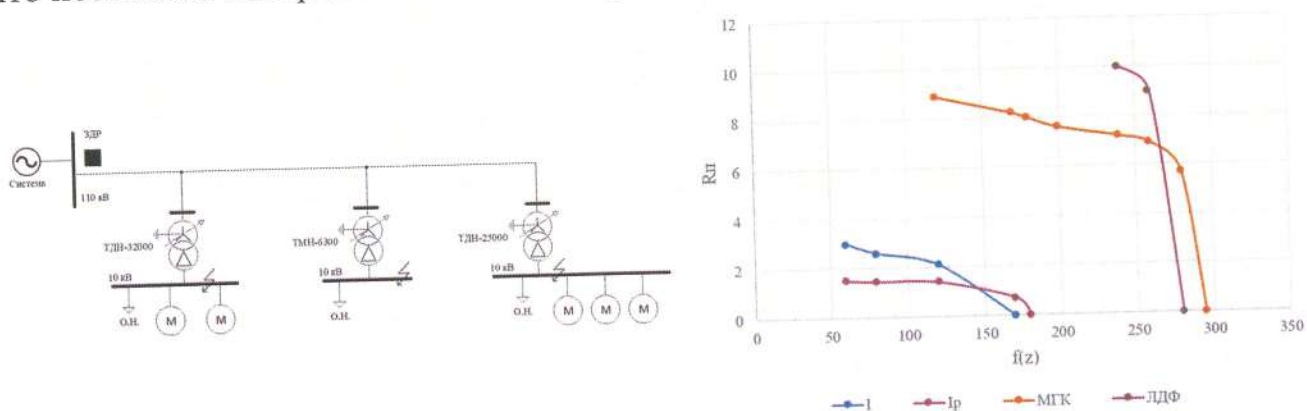


Рис. 14. Оценка эффективности обобщенного признака на объектных характеристиках.

В качестве защит, использующих один признак для распознавания аварийных режимов, рассмотрены токовые защиты, основанные на величине

полного и реактивного тока. Полученные новые признаки, за счет применения МГК и ЛДФ, многократно превосходят все известные признаки, по которым происходит распознавание режимов. Также были разработаны логические схемы пусковых органов с применением МГК и ЛДФ для защит дальнего резервирования.

Было рассмотрено применение ИНС в логической части РЗА для распознавания внутренних (витковых) замыканий в обмотках силового трансформатора. Силовые трансформаторы являются одними из наиболее важных и ответственных элементов энергосистем, при этом эффективность РЗ, установленных на них, является одной из самых низких. Лишь в 70 % случаев повреждений РЗ правильно и своевременное реагирует, предотвращая дальнейшее развитие аварии. Одной из главных проблем является распознавание внутренних (витковых) замыканий в силовом трансформаторе. Была исследована возможность применения ИНС для повышения распознаваемости РЗ силовых трансформаторов витковых замыканиях в обмотках.

Для исследования была выбрана схема участка электрической сети с силовым трансформатором. Разработана математическая модель силового трансформатора с шестью индуктивно связанными катушками, учитывающая собственные и взаимные сопротивления, как в нормальных режимах, так и при различных витковых замыканиях. Для реализации нейросетевых алгоритмов требуется получение статистических данных о режимах работы силового трансформатора в различных схемно-режимных ситуациях (нормальная загрузка; витковые замыкания). Для этого используется точная имитационная *Matlab*-модель сети с изменяющимися параметрами сети в соответствующих диапазонах.

Предложено два варианта использования нейросетевых алгоритмов. Первый – использовать ИНС непосредственно для принятия решения, второй – использовать ИНС для расчета коэффициентов многопараметрической защиты. При исследовании был использован метод обратного распространения ошибки, являющийся методом точной настройки весов ИНС на основе коэффициента ошибок, полученного в предыдущих прогонах всей обучающей выборки.

При обучении ИНС для непосредственного принятия решений в качестве выходных значений были выбраны «0» или «1» при нормальном режиме и витковом замыкании соответственно. Обучение ИНС проводилось на разных сочетаниях входных параметров.

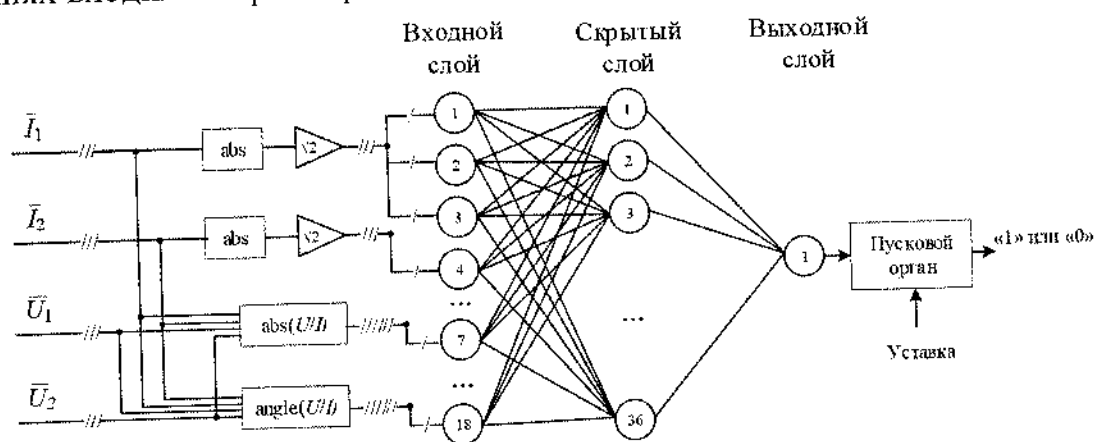


Рис. 15. Структура алгоритма защиты с непосредственным принятием решений.

В качестве входных параметров ИНС использовались действующие значения токов с двух сторон силового трансформатора и значения модуля и угла фазных сопротивлений, рассчитанных по параметрам сети со стороны высокого и низкого напряжения силового трансформатора. Была определена наиболее рациональная структура алгоритма непосредственного принятия решений (рис. 15) с конфигурацией 18-36-1 (18 входных нейронов, 36 нейронов в скрытом слое и 1 выходной нейрон, который отвечает за принятие решений).

На рис. 16 представлен график результатов тестирования сети указанной конфигурации. По оси x откладывается выходное значение нейронной сети, которое должно быть равно «1» при витковом замыкании и «0» при нормальном режиме, а по оси y откладывается значение размера замкнутой части обмотки в процентах. Погрешность выходного значения ИНС не превышает 1,1% для витковых замыканий и 0,22% – для нормального режима.

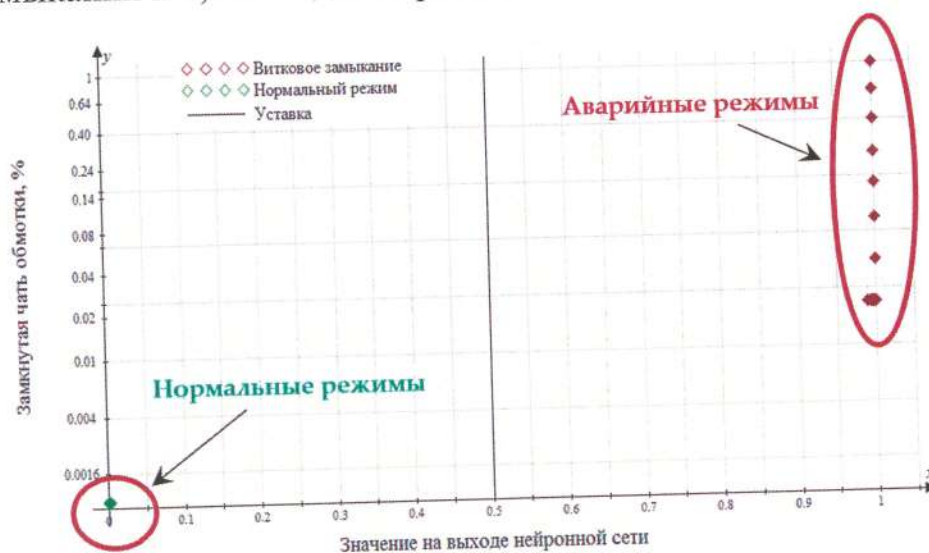


Рис. 16. Распределение выходных значений нейронной сети.

Точность принятия решений ИНС оказалась достаточно высокой, при этом проверка проводилась по ограниченной тестовой выборке режимов, как при обучении, так и при тестировании ИНС. Очень сложно учесть абсолютно все возможные режимы работы силового трансформатора, поэтому нет уверенности, что ИНС в каждом конкретном случае поведет себя корректно и примет правильное в данной ситуации решение. При подаче на нейронную сеть входных данных, которые не входили в исходную обучающую выборку, ее поведение может быть непредсказуемо и отличаться от ожидаемого. Поэтому был рассмотрен вариант ИНС для расчета обобщенных признаков в работе РЗ. С помощью ИНС формируется обобщенный признак μ , предназначенный для распознавания витковых замыканий. Для осуществления этого используются информативные признаки x_i , полученные при составлении обучающей выборки. В предлагаемом решении ИНС используется как инструмент расчета коэффициентов (весов) w_i , при этом выходное значение μ , представляет собой некую абстрактную величину, не имеющую физического смысла (рис. 17). Принятие окончательного решения соответствует принципу простых токовых защит – сравнение с заданной уставкой.

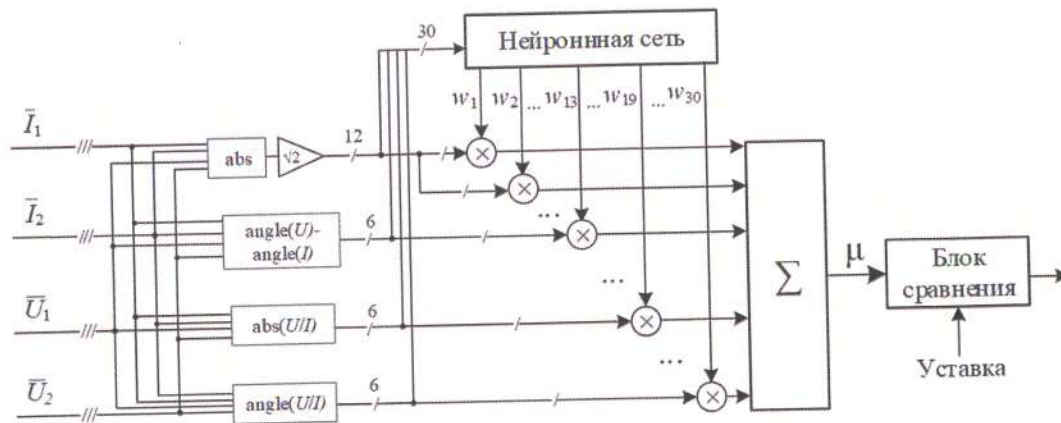


Рис. 17. Алгоритм защиты по обобщенному признаку.

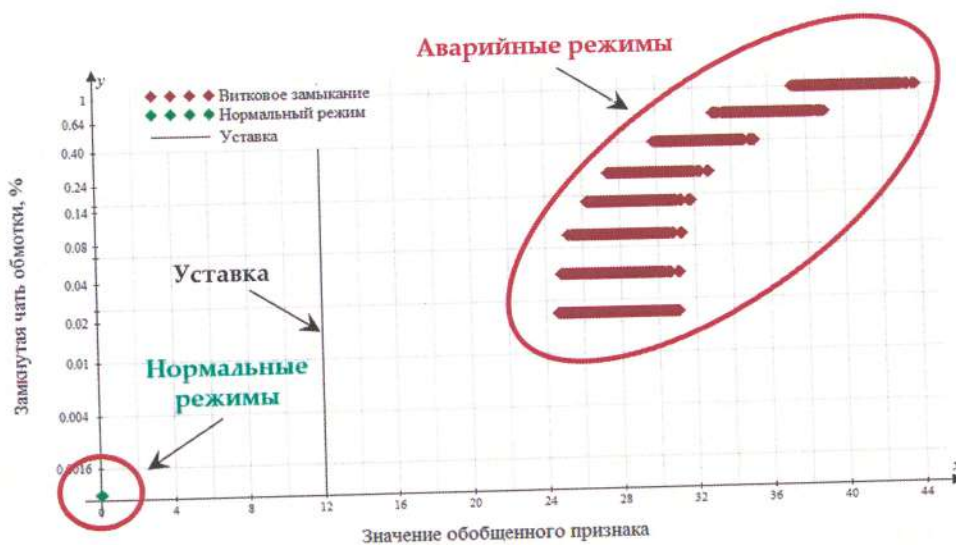


Рис. 18. Распределение значений обобщенного признака.

На рис. 18 приведена зависимость значения обобщенного признака от величины закороченной части обмотки (для нормального режима закороченная часть обмотки равна 0). Проверка проводилась по тестовой выборке. Как видно из графика на рис. 18, значение обобщенного признака для нормального режима работы силового трансформатора близко к 0, а для режима с витковым замыканием признак принимает значения более 24. Для разделения режимов принята уставка, позволяющая однозначно разделить указанные режимы, равная 12.

По результатам моделирования был построен график (рис. 19), позволяющий сравнить чувствительность традиционной дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ) и предложенной защиты при витковых замыканиях. Из рис. 19 видно, что чем выше нагрузка силового трансформатора и протекающий через него сквозной ток, тем серьезнее должно быть витковое замыкание и, соответственно, дифференциальный ток для распознавания ДЗТ повреждения.

Анализ рис. 19 показывает, что распознаваемость витковых замыканий предложенной защитой в разы лучше по сравнению с традиционной ДЗТ. Данное техническое решение позволяет распознать витковые замыкания в обмотках силового трансформатора с величиной закороченной части обмотки равной 0,01%, т.е. на ранней стадии развития аварии.

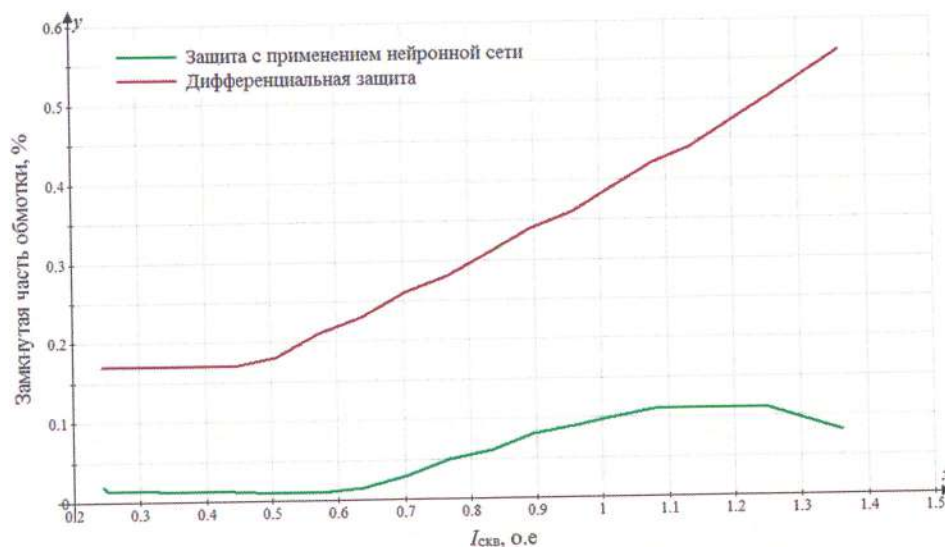


Рис. 19. График сравнения чувствительности защит.

Третий раздел доклада посвящен аппаратно-программной реализации многопараметрических устройств РЗА с применением компонентов промышленной автоматизации высокой заводской готовности.

В соответствии с концепцией «цифровой подстанции» создание прорывных решений для управления и защиты цифровых «интеллектуальных» сетей, особенно для сетей с ИРГ, которые могли бы быть масштабируемыми и обеспечивали необходимые требования информационной безопасности, особо актуальны в современных условиях. С поддержкой государственных контрактов, хоздоговоров и грантов в течении 8 лет при активном участии ученых из НГТУ им. Р.Е. Алексеева была создана новая отечественная аппаратно-программная платформа для реализации устройств РЗА и ИЭУ для электроэнергетики.

Аппаратная часть ИЭУ выполнена преимущественно на отечественной элементной базе и масштабируются под конкретный энергообъект. На рис. 20 представлены различные компоненты: платы входов/выходов, вычислитель, решающий конкретную задачу, платы резервирования, для обеспечения работы протокола *PRP* или *HSR*, компьютер на базе платформы Эльбрус и др.

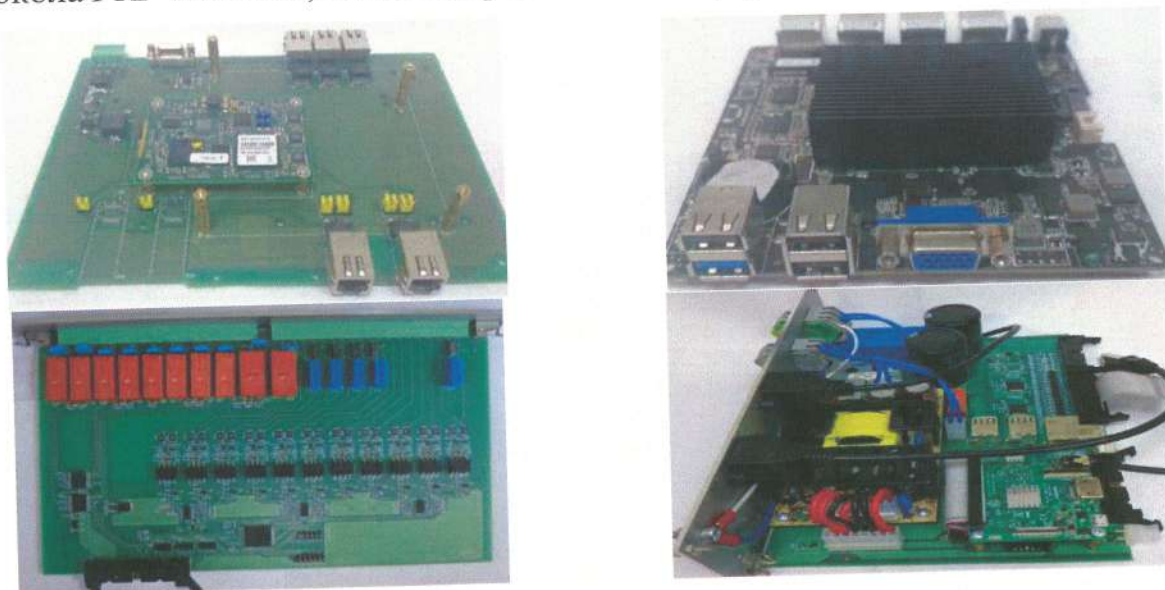




Рис. 20. Разработанные компоненты с использованием отечественной элементной базы.

Разработаны различные варианты структур устройств РЗ в зависимости от класса напряжения, требований к РЗ и необходимого набора функций.

На рис. 21 показан оптимальный вариант экспериментального образца ИЭУ с ЖК-дисплесм, мнемоническими схемами, индикацией, удобным человеко-машинным интерфейсом, аналоговыми, дискретными, цифровыми входами/выходами и поддержкой МЭК 61850.

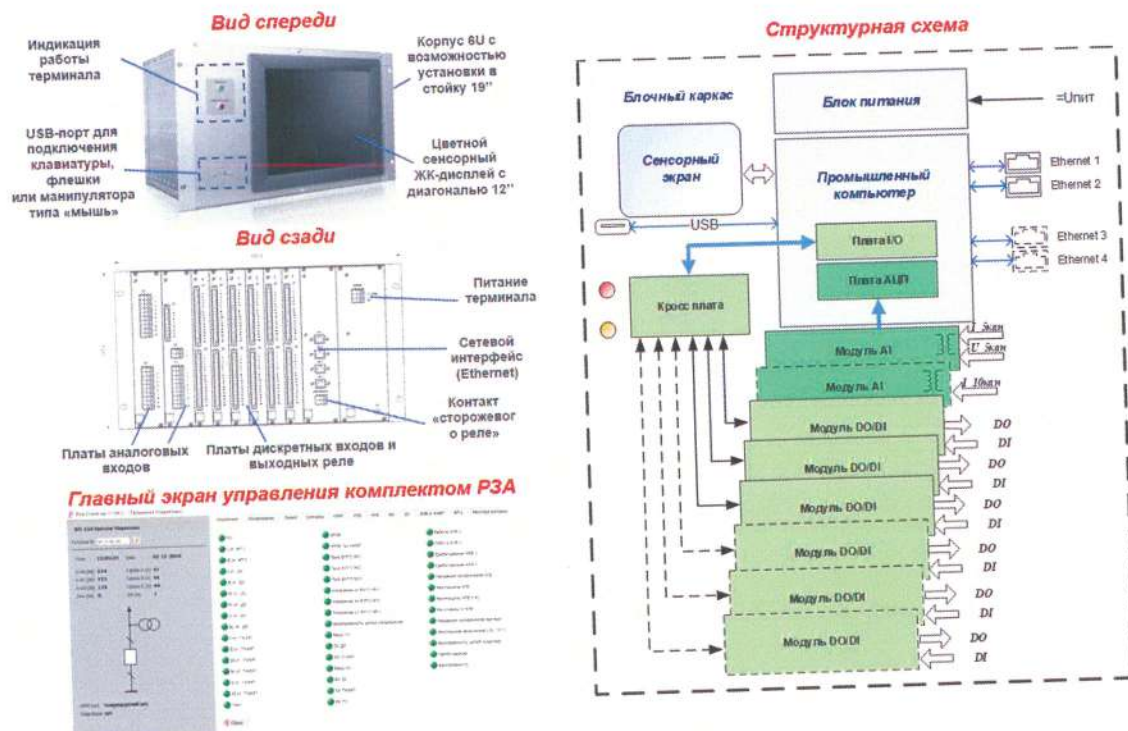


Рис. 21. Вариант экспериментального образца устройства РЗ.

Особым преимуществом и отличительной особенностью технического решения является создание системного и конфигурационного программного обеспечения (ПО), обеспечивающего управление и работу терминала РЗА с применением протокола МЭК 61850. ПО позволяет конфигурировать основные функции и разрабатывать внутреннюю логику алгоритмов защит с использованием блоков встроенного языка функциональных диаграмм (FBD) (рис. 22).

Предложенный подход позволяет обеспечить универсальность платформы, а также возможность в кратчайшие сроки перепрограммировать ИЭУ с изменением внутренней логики, без изменения аппаратной реализации терминала.

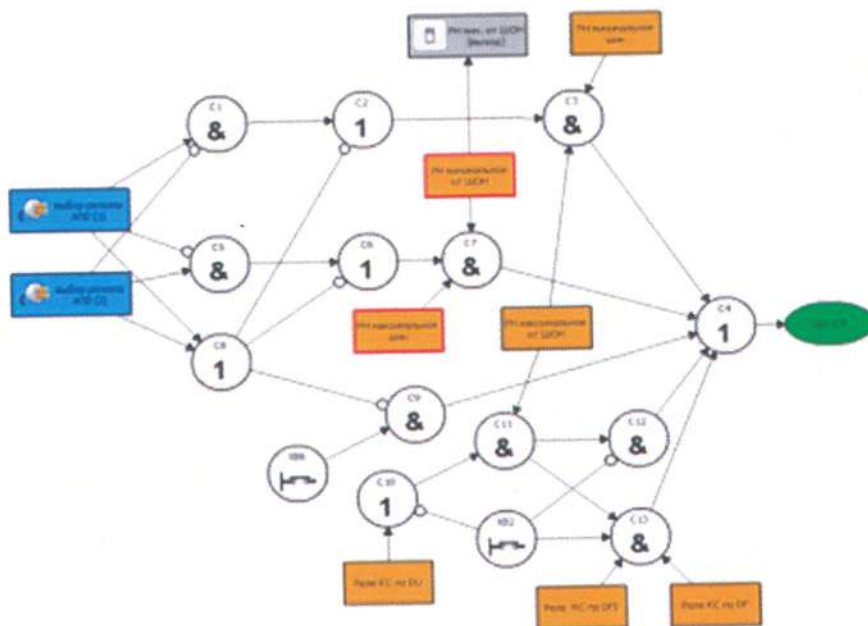


Рис. 22. Создание логической схемы в приложении «Редактор схем».

Были разработаны варианты централизованных решений РЗА, в которых одно физическое устройство, с фиксированным набором функций, защищает несколько присоединений, а резервирование функций выполняется в другом аналогичном ИЭУ.

ИЭУ в различных вариантах исполнения находятся в опытно-промышленной эксплуатации на электросетевых объектах: ЛЭП 110 кВ «Урень-Ветлуга»; ЛЭП 6-35 кВ ПС «Моховые горы»; ЛЭП 110 кВ «Пиголи-Нармонка» и др., а также на цифровом полигоне ПАО «Русгидро» (Нижегородская ГЭС). Получено около 15 патентов на разработку ИЭУ и способы реализации РЗ. Оборудование прошло сертификацию по стандарту МЭК 61850. Терминалы РЗ аттестованы в ПАО «Россети» и полностью соответствуют СТО 56947007 29.120.70.241-2017 ПАО «ФСК ЕЭС» «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА». На базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева создана лаборатория «Цифровое моделирование электроэнергетических систем, устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики в реальном времени» для проведения исследований и предварительных испытаний разрабатываемых ИЭУ.

По докладу можно сделать следующие основные выводы:

1. Предложен концептуальный вариант смешанного двухуровневого информационного подхода к РЗА в сетях с ИРГ с адаптивной многопараметрической защитой и гибкой логикой работы на втором уровне.
2. Рассмотренные статистические методы и методы объединения бинарных сигналов от пусковых органов (ПО) позволяют повысить чувствительность многопараметрической РЗА и распознаваемость аварийных режимов на 5-70%, в зависимости от конфигурации сети и требований к организации РЗ энергообъекта.
3. Организация логики РЗ с объединением операций «ИЛИ» и применением мажоритарного принципа обеспечила высокую надежность логической (программной) части устройства, оценка которой вычислена с использованием теории Марковских процессов.

4. Рассмотрены методы реализации многопараметрической РЗА с объединением информационных признаков ИНС, что повышает распознаваемость аварийных режимов, в том числе на ранних стадиях развития аварий.

5. Представлены примеры реализации методов «сжатия данных» для перехода к обобщенному признаку в логической части многопараметрической РЗА, позволяющие повысить распознаваемость режимов и упростить их реализацию посредством использования принципа сравнения с уставкой.

6. В НГТУ им. Р. Е. Алексеева создана новая отечественная аппаратно-программная платформа для реализации рассматриваемых методов в РЗА и интеллектуальных электронных устройствах для электроэнергетики.

В обсуждении доклада и прениях выступили: Воробьёв В.С., Жуков А.В. (АО «СО ЕЭС»), Гусев Ю.П., Хазиахметов Р.М., Вольный В.С. (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), Терешко О.А. (ВАК), Мухлынин Н.Д. (ФГАОУ ВО «УрФУ»), Бык Ф.Л. (ООО «Интеллэнергия»), Шеметов А.С. (ПАО «Россети»), Сидоров С.М. (ФГБОУ ВО «Севастопольский государственный университет»), Илюшин П.В. (НП «НТС ЕЭС», ФГБУН «ИНЭИ РАН»).

Воробьёв В.С. – начальник службы РЗА АО «СО ЕЭС».

Уточнена мощность рассматриваемых ИРГ, которая по международной классификации составляет, как правило, не более 25 МВт.

Отмечено, что в настоящее время ветровые и солнечные электростанции не рассматриваются как объекты диспетчеризации, выдающие мощность в транзитную сеть 110-220 кВ, для которых вопрос РЗ решается установкой основных защит и устройств противоаварийной автоматики, обеспечивающих устойчивое функционирование энергосистем. Так как этих электростанций осуществляется через инверторы, переходящие в режим токоограничения при авариях, то АО «СО ЕЭС» не наблюдает их существенного влияния на функционирование магистральных электрических сетей.

Высказана положительная оценка содержательного, многоуровневого доклада. Особо отмечен раздел, связанный с отечественной элементной базой для построения перспективных устройств РЗА.

Гусев Ю.П. – профессор кафедры «Электрические станции» ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», к.т.н., профессор.

Отмечена глубокая методическая проработка доклада, вызывающего интерес, свежесть и инновационность рассматриваемых решений.

Высказано мнение о том, что распределенная генерация на качественном уровне меняет сети среднего напряжения, которая из радиальной становится сложно-замкнутой. В докладе оставлены в стороне токовые направленные защиты, возможно требующие изменения подхода в случае изменения конфигурации сети. В качестве пояснения докладчик отметил, что акцент сделан на втором уровне концептуальной структуры РЗА, рассматривающей многопараметрическую РЗА относительно селективности, которая использует все возможные имеющиеся данные в точке сети (мгновенные значения токов и напряжений, которые можно математически

обрабатывать и получать признаки режима: абсолютные значения токов, напряжений, активные и реактивные сопротивления, приращения тока, углы и др.). Данные информативные признаки идентифицируют режим (нормальный или аварийный).

Опыт эксплуатации сетей 6-35 кВ показывает, что дифференциальная защита не всегда себя оправдывает в связи с тем, что у нее блокировка по углу срабатывания находится в диапазоне от 60° до 90° , а реальные сквозные токи могут иметь угол больше 90° . Поэтому вопрос построения РЗ в сложно-замкнутых сетях с ИРГ очень актуален, важен и нуждается в детальной проработке. Наряду с имитационным моделированием требуется оценка аппаратной части РЗА для оценки их надежности. Докладчик пояснил, что классические подходы к построению РЗ в сетях среднего напряжения остаются. При правильной работе традиционных РЗА нет необходимости внедрять сложные алгоритмы. Однако, при массовом внедрении разнородных ИРГ режимы работы становятся сложными, неоднозначными и классические токовые направленные защиты, максимально-токовые защиты и токовые отсечки будут работать некорректно. Предлагаемый альтернативный подход, использующий всю возможную информацию от измерительных преобразователей, позволяет повысить эффективность РЗ. На первом этапе используются результаты имитационного моделирования для получения необходимых областей срабатывания, а на последующих возможно дополнение статистической базы данных фактическими замерами параметров режима. Предложенный подход может быть использован как в качестве дополнения к классическим РЗА, так и с целью замены защит, работающих некорректно в рассматриваемых сетях. В технических решениях применяется стандарт обмена данными МЭК 61850, обеспечивающий на принципиально новом уровне решение поставленных задач, что особенно актуально в сетях электроснабжения промышленных предприятий, где возникают проблемы с РЗА.

Мухлынин Н.Д. – доцент кафедры «Автоматизированные электрические системы» УралЭНИИ ФГАОУ ВО «УрФУ», к.т.н.

Отмечен высокий уровень доклада. Задан вопрос о том, позволяет ли предложенный подход к построению резервных многопараметрических РЗА обеспечить соответствие требованиям по быстродействию и чувствительности, предъявляемым к основным защитам, основанным на дифференциальном принципе, без использования каналов связи? Докладчик отметил, что предложенные методы позволяют приблизиться по быстродействию и селективности к дифференциальной защите, однако достигнуть их достаточно сложно. Суть доклада состоит в разработке методологии построения логической части и алгоритмов многопараметрических РЗА. Однако, за счет накопления статистических данных по параметрам аварийных режимов, имеется возможность для повышения быстродействия и чувствительности РЗА, что позволит в будущем отказаться от каналов связи, но это не гарантировано. Требуются результаты опытно-промышленной эксплуатации на протяжении нескольких лет.

Терешко О.А. – руководитель УМЦ НП «КОНЦ ЕЭС», д.т.н., профессор.

Задан вопрос о том, как изменятся показатели надежности внешнего электроснабжения в случае внедрения предложенных устройств РЗА и есть ли в

них целесообразность? Докладчик отметил, что количество отключений ИРГ при «близких» КЗ и, соответственно, убытков от этих отключений возрастало в несколько раз. До ввода ИРГ внешние короткие замыкания не приводили к остановке технологического процесса. При вводе ИРГ и возникновении в сети «близких» КЗ нарушался баланс реактивной мощности, что приводило к отключению ИРГ и развитию лавины напряжения, с последующим отключением всех технологических линий. В этом случае поставленная задача решается за счет быстрого распознавания места короткого замыкания и его локализации, что позволяет обеспечить надежное электроснабжение промышленных предприятий.

Бык Ф.Л. – Директор ООО «Интеллэнергия», к.т.н., доцент.

Выразил мнение о том, что если речь идет о надежности электроснабжения, то имеется виду частота и продолжительность отключений потребителей (индексы *SAIDI* и *SAIFI*). При грамотном выборе компенсирующих устройств реактивной мощности в сети электроснабжения промышленного предприятия отключение ИРГ фактически не скажется на напряжении в узлах сети.

Отмечено, из сетей электроснабжения промышленных предприятий с ИРГ нет перетоков мощности в сети напряжением 110 кВ и выше. По существующим правилам ПАО «Россети» не допускается выдача мощности в распределительные сети из сети электроснабжения промышленных предприятий. С точки зрения надежности переток мощности в сеть 110 кВ должен быть ограничен половиной мощности единичного трансформатора. В прилегающих распределительных сетях при этом схемно-режимные ситуации при этом не изменяются. В то время как режимы в сети электроснабжения промышленного предприятия меняются существенно. Поэтому область применения исследований докладчика следует сосредоточить на энергорайонах распределительных сетей с присоединением к ним систем электроснабжения промышленных предприятий с ИРГ.

Способы online и offline в РЗА соответствуют принципам II-ДО, I-ДО в противоаварийной автоматике. II-ДО работает по решетке решений, что соответствует offline расчетам режимов. При реализации online алгоритмов расчет режимов производится в темпе процесса при изменении схемно-режимных ситуаций. В докладе просматриваются подходы к реализации функций противоаварийной/режимной автоматики, требующих учета вопросов управления.

Высказал мнение, что представленная работа является новым теоретическим исследованием с заделом на будущее, заслуживает высокой оценки с позиции системного подхода к проблеме РЗА. Актуальным остается вопрос надежности системы электроснабжения с ИРГ.

Жуков А.В. – советник директора Группы советников АО «СО ЕЭС», к.т.н.

Отметил признательность докладчику, высокий уровень содержательности и наукоёмкости исследования. Выразил мнение о том, что в докладе следовало бы сосредоточить больше внимания на методах. Первый раздел, связанный с обоснованием, следовало бы конкретизировать по классам напряжения и видам защит, имеющих принципиальные отличия.

Обратил внимание, что в эксплуатации вопросы модернизации являются

очень болезненными. Переход с электромеханических реле на микропроцессорные терминалы идет очень медленно, и в перспективе он продлится не менее 25 лет, учитывая объективные трудности. Вопрос о целесообразности инвестиций в сети напряжением 6-35 кВ всегда остается открытым. К тому же объем ИРГ не такой уж и большой и составляет около 4% в энергобалансе.

Вопрос комплексности подхода к РЗА в сетях с ИРГ безусловно актуальный и требует рассмотрения. Требуют обсуждения концептуальные этапы развития РЗА, которые должны учитывать время перехода по этапам и преемственность решений на каждом этапе. Прежде чем что-то предлагать, нужно дать оценку проблемных вопросов в РЗА с точки зрения переходных процессов. Важен вопрос реализуемости предложенных методов. Не хотелось бы, чтобы известные методы цифровой обработки сигналов и машинного обучения шаблонно применялись в РЗ. Применение мажоритарного принципа в РЗА рассматривалось 40 лет назад, когда вычислительная аппаратная часть работала неустойчиво. Как только аппаратная часть стала работать надежно, то от данного принципа отказались. Не всегда понятно, что лучше: излишнее срабатывание или отказ в срабатывании. Открытым остается вопрос оптимальности предложенных технических решений.

Новые тенденции, с точки зрения развития технологий, для эксплуатации являются «черным ящиком». Устройство РЗ должно быть понятным для персонала, включая вопросы его функционирования и технического обслуживания. Докладчик дал комментарии о том, что повышение эффективности распознаваемости аварийных режимов даже на небольшой процент уже является положительным и нуждается в исследовании. Финансовые и экономические вопросы на данном этапе сложно оценить. Это зависит от массовости внедрения ИРГ в сети напряжением 6-35 кВ. Реализация изложенных технических решений и части наиболее эффективных алгоритмов планируется на разработанной аппаратно-программной платформе в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Применение мажоритарного принципа предложено для программной (логической) части устройства РЗА, а не аппаратной части, где он является архаичным.

Отмечен вклад коллег из НГТУ им. Р.Е. Алексеева в разработку аппаратно-программной платформы, за которую авторский коллектив получил Премию Правительства РФ в 2020 г. в области науки и техники.

Шеметов А.С. – начальник управления развития РЗА и метрологии Департамента РЗА, метрологии и АСУТП ПАО «Россети».

Следует дать пояснения по организации связи по МЭК 61850 и тому, есть ли необходимость обмена SV потоками, перегружающими сеть. Были ли рассмотрены варианты по смене групп уставок в зависимости от режимов работы сети, что более прозрачно с точки зрения эксплуатации? Имеются вопросы по стоимости реализации предлагаемых технических решений, подходам к проведению обучения и переобучения ИНС. Мажоритарная логика в ПАО «Россети» была применена в устройствах противоаварийной автоматики (ООО «Прософт-Системы»), где были задействованы серверы с тремя процессорами, работающими по мажоритарному принципу. Вопрос оправданности данного решения оказался весьма спорным, от которого в последствии отказались. Алгоритмы устройств РЗА с ИНС, способные

предотвращать развитие аварий (внутренние повреждения в силовых трансформаторах) вызывают большой интерес, поскольку проблема весьма актуальна. Возникает сложность в том, кто будет производить формирование признаков срабатывания и обучение ИНС. Поручить выполнение указанных действий расчетчикам служб РЗА весьма сложно и трудоемко.

Докладчик пояснил, что шина процесса по МЭК 61850 представляет собой распределенный фидер и является удаленной в пределах расстояний на территории промышленного предприятия или небольшого энергорайона. Реализация РЗ группами уставок возможна и этот метод является альтернативным. Стоимость реализации предложенного решения не отличается от обычного микропроцессорного терминала. Значительная часть времени требуется для адаптации программной части, формирования её измерительных и пусковых органов, а также формирования областей срабатывания по результатам многочисленных модельных экспериментов. При изменении топологии сети, новых потребителей и ИРГ потребуются переобучение ИНС. Однако, при наличии ПО, переобучение можно выполнить достаточно быстро. Реализация защиты силового трансформатора на основе алгоритма РЗА с ИНС успешно апробирована на *Matlab*-модели. Реализация реального устройства РЗА с данной функцией требует наличия точной модели силового трансформатора, учитывающей дополнительные параметры: температуру, условия эксплуатации, старение изоляции, сопротивление обмоток и др. Применение новых методов повышает требования к эксплуатационному и проектному персоналу, использующему расчетные комплексы и ПО, поставляемое в комплекте с устройством РЗА.

Отмечено, что с точки зрения текущих реалий, особенно на промышленных предприятиях с ИРГ, предлагаемая совокупность технологий и методов является перспективным и реалистичным направлением совершенствования РЗА. Высказано мнение, что прибегать к сложным многокритериальным методам целесообразно только в случае неработоспособности более простых защит.

Хазиахметов Р.М. – профессор кафедры «Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии» ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ».

Высказано сомнение в том, что надежность работы устройств РЗА в этом случае будет зависеть от состояния систем связи и передачи данных, а также возможности работы системы в автономном режиме. Все зависит от того, используется исходная информация только для обучения ИНС или же для реализации алгоритмов работы РЗА.

Упор сделан на работу устройств РЗА в режиме *offline* за счет предварительного обучения ИНС при этом автономная работа возможна. Повышение эффективности работы РЗА возможно за счет дополнения статистической базы данными фактических измерений параметров режима.

Вольный В.С. – старший преподаватель кафедры «Релейной защиты и автоматизации энергосистем» ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ».

В переходных процессах могут возникать погрешности измерений в устройствах РЗА, что необходимо учитывать. Возможно повысить качество

сигналов от обмоток измерительных трансформаторов тока с высокими классами точности и минимизировать ошибку при поиске лучшего решения для ИНС. Отмечено, что элементы цифровой обработки сигналов (ЦОС), реализованные в измерительных органах РЗА, способны в достаточной степени оценить сигналы токов и напряжений. Эффективность ЦОС является отдельной задачей.

Сидоров С.М. – доцент кафедры «Интеллектуальные сети энергоснабжения» ФГБОУ ВО «Севастопольский государственный университет», к.т.н.

Использование множества параметров режима не всегда является лучшим решением. Какое количество параметров режима является оптимальным для решения поставленной задачи? Докладчик пояснил, что выбор оптимального, наиболее информативного параметра является отдельной трудоемкой задачей, которая в полной мере еще не решена. Требуется длительное время для анализа и оценки всевозможных параметров. Интуитивно наилучшим параметром является ток, и его приращение. Дело в том, что ставится задача не минимизации информации для принятия решения, а сбора и/или восполнения информации в случае ее потери каким-либо пусковым или измерительным органом.

Илюшин П.В. – председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», д.т.н.

Аппаратно-программная платформа и устройство, но без рассматриваемых в докладе методов, соответствует требованиям, предъявляемым ПАО «Россети» к микропроцессорным устройствам РЗА, и аттестовано. Предложенные подходы реализуются в измерительной и логической части устройств РЗА. Необходимо поставить в опытно-промышленную эксплуатацию устройства РЗА нового типа, например, в сеть электроснабжения промышленного предприятия с ИРГ. И по ее результатам сформировать выводы и рекомендации по применению наиболее эффективных методов, алгоритмов и дальнейшему тиражированию предложенного технического решения. Следует установить экспериментальный образец устройства защиты силового трансформатора от витковых замыканий с ИНС на старый силовой трансформатор, у которого высока вероятность возникновения витковых замыканий. По результатам опытно-промышленной эксплуатации сделать вывод об эффективности данной разработки.

Отметил, что работа в выбранном направлении исследования заняла у автора значительное время. Представленный материал, как видно из высказываний, высоко оценен коллегами на заседании секции НТС ЕЭС. Отмечены актуальность, значимость, познавательность доклада, а также перспективность темы научного исследования. Автор поставил перед собой большую научную задачу, которая является востребованной, поэтому работа над ней должна быть продолжена.

Совместное заседание отмечает

1. Проведенное исследование и полученные результаты представляют значительный интерес для электроэнергетического сообщества в целом и электросетевых компаний в частности, учитывая масштабы внедрения ИРГ, в том числе в сетях электроснабжения промышленных предприятий.

2. Актуальность предложенного концептуального варианта смешанного двухуровневого информационного подхода к построению РЗА в сетях с ИРГ с адаптивной многопараметрической защитой и гибкой логикой на втором уровне.

3. Новизну математического аппарата, применяемого для классификации и распознавания режимов работы (нормальных; аварийных) в сетях с ИРГ.

4. Предложенные статистические методы и методы объединения бинарных сигналов от пусковых органов позволяют повысить чувствительность многопараметрической РЗА и распознаваемость аварийных режимов на 5-70%, в зависимости от структуры сети и требований к организации РЗА энергообъекта.

5. Организация логики РЗ с объединением операций «ИЛИ» и применением мажоритарного принципа позволяет, как показали расчеты, обеспечить высокую надежность программной части устройств РЗ, оценка которой вычислена с использованием теории Марковских процессов.

6. Методы реализации многопараметрической РЗА с объединением информационных признаков ИНС, позволяет повысить распознаваемость аварийных режимов, в том числе на ранних этапах развития повреждений.

7. Представленные примеры реализации методов «сжатия данных», с целью перехода к обобщенному признаку в логической части многопараметрической РЗА, позволяют повысить распознаваемость режимов и упрощают логику реализации по принципу сравнения с уставкой.

8. В НГТУ им. Р. Е. Алексеева создана новая отечественная аппаратно-программная платформа для реализации рассматриваемых методов в РЗА и интеллектуальных электронных устройствах (ИЭУ) для электроэнергетики.

9. Требуется дальнейшее развитие и совершенствование представленной методологии и её реализации в экспериментальных образцах устройств РЗА с организацией их последующей опытно-промышленной эксплуатации.

Совместное заседание решило

1. Рекомендовать автору продолжить исследования и разработки в данном научном направлении, с учетом особенностей режимов работы распределительных сетей и сетей электроснабжения промышленных предприятий с ИРГ.

2. Рекомендовать автору скорректировать область применения результатов исследования – распределительные сети среднего напряжения с присоединяемыми к ним сетями электроснабжения промышленных предприятий с ИРГ.

3. Рекомендовать автору реализовать наиболее эффективные из предложенных методов в экспериментальном образце устройства РЗА для последующего проведения натурных испытаний на динамических моделях и комплексах полунатурного моделирования.

4. Рекомендовать электросетевым компаниям, после исполнения п. 1-3 рассмотреть возможность реализации пилотных проектов внедрения устройств РЗА на силовых трансформаторах, а также в распределительных сетях, к которым подключены сети электроснабжения промышленного предприятия с ИРГ.

5. Рекомендовать крупным/средним промышленным и непромышленным потребителям, после реализации п. 1-3 рассмотреть возможность реализации пилотных проектов внедрения устройств РЗА в системах электроснабжения

промышленных предприятий с ИРГ и сложными схемно-режимными условиями.

6. Рекомендовать региональным диспетчерским управлениям Системного оператора рассмотреть результаты реализации пилотных проектов внедрения устройств РЗА на силовых трансформаторах и в распределительных сетях с ИРГ и сложными схемно-режимными условиями.

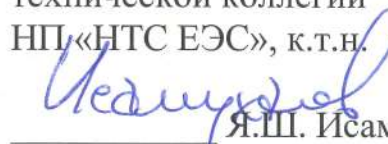
С заключительным словом выступил д.т.н. Илюшин П.В., председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН».

Проведенное исследование и полученные результаты представляют значительный интерес для субъектов электроэнергетики, в которых эксплуатируется значительное количество устройств РЗА. Массовое внедрение ИРГ в распределительных сетях среднего напряжения требует пересмотра подходов к построению логической части устройств РЗА, так как в противном случае это может приводить к отказам в срабатывании, а также излишним и ложным срабатываниям устройств РЗА. Особый интерес результаты исследования, представленные автором, должны вызвать на данном этапе у главных энергетиков промышленных предприятий, где массово внедряются ИРГ и у главных инженеров распределительных сетевых компаний, к сетям которых присоединяются сети электроснабжения промышленных предприятий с ИРГ. Было бы полезно реализовать пилотный проект по внедрению ИЭУ с предложенными принципами реализации логической части устройств РЗА в сетях электроснабжения одного из промышленных предприятий и затем представить полученные результаты, в сравнении с традиционными устройствами РЗА, эксплуатируемыми там же.

Первый заместитель Председателя
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС»,
д.т.н., профессор

 В.В. Молодюк

Ученый секретарь Научно-
технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.

 Я.Ш. Исамухамедов

Председатель секции «АСРЭ и РЭР»
НП «НТС ЕЭС», ученый секретарь Секции
по проблемам НТП в энергетике
Научного совета РАН по системным
исследованиям в энергетике, д.т.н.

 П.В. Илюшин

Ученый секретарь секции «Активные
системы распределения ЭЭ и РЭР»
НП «НТС ЕЭС»

 Д.А. Ивановский