

На правах рукописи



ПРУТИК АЛЕКСЕЙ ФЕДОРОВИЧ

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
НАСТРОЙКИ ТОКОВЫХ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ И МЕТОДИКА ЕЕ
ПОВЫШЕНИЯ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Шмойлов Анатолий Васильевич
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Литвак Валерий Владимирович
доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, профессор кафедры атомных и тепловых станций

Останин Андрей Юрьевич
кандидат технических наук, Филиал ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири, начальник Службы перспективного развития

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Защита состоится «30» мая 2012 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГБОУ ВПО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО НИ ТПУ.

Автореферат разослан «28» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.10, д.т.н., с.н.с.



Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Согласно статистике, причиной значительного числа тяжелых аварий и их развития в электроэнергетических системах (ЭЭС) (по разным оценкам не менее 25 %) служат неправильные действия релейной защиты и автоматики (РЗА), обусловленные использованием при их проектировании и настройке неполной и недостаточно достоверной информации о процессах и режимах в ЭЭС. Неточность и неполнота данной информации обусловлена имеющимися сложностями ее получения, а также случайным характером процессов и режимов в ЭЭС, и характеризующих их электрических величин соответственно. Указанные условия функционирования РЗА не учитываются при определении их настроек, что в ряде случаев приводит к неправильным действиям (ложным и излишним срабатываниям, отказам в срабатывании).

Значительный вклад в решение вопросов разработки и совершенствования методов оценки надежности, эффективности функционирования и настройки РЗА, внесли следующие отечественные ученые: Беркович М.А., Фабрикант В.Л., Кулиев Ф.А., Смирнов Э.П., Рипс Я.А., Барзам А.Б., Гук Ю.Б., Зейлидзон Е.Д., Манов Н.А., Федосеев А.М., Гельфанд Я.С., Манусов В.З., Каринский Ю.И., Якоб Д., Шалин А.И., Манов Н.А., Мёллер К.Ю., Коновалова Е.В., Нудельман Г.С., Гуревич В.И., Шнеерсон Э.М., Куликов А.Л. и др.

Проанализировав работы вышеуказанных авторов и предлагаемые ими методы и математические выражения, необходимо отметить, что большая часть работ направлена на оценку и повышение либо сугубо аппаратурной надежности, либо интегральной эффективности, учитывающей все причины потерь функционирования (неправильных действий) РЗА: аппаратурные отказы, ошибки эксплуатационного и монтажного персонала, влияние внешней среды, неблагоприятная электромагнитная обстановка, неправильная настройка и др.

Ввиду отмеченного случайного характера процессов и режимов в ЭЭС, различными авторами (Шалин А.И., Якоб Д., Мёллер К.Ю., Каринский Ю.И.) были представлены вероятностно-статистические подходы для оценки эффективности настройки РЗА и оптимизации уставок. Однако, они не получили широкого распространения из-за отмечаемых самими авторами сложности, высокой ресурсоемкости (использование метода Монте-Карло при большом числе входных или исходных данных), а в ряде случаев невозможности получения законов распределения вероятностей электрических величин, являющихся параметрами реагирования РЗА.

В соответствии с вышеизложенным, работы в области оценки надежности, качества функционирования и повышения эффективности РЗА в целом, в настоящее время продолжают оставаться актуальными.

Цель работы и задачи исследования

Целью диссертационной работы является обоснование и разработка критерия технической эффективности (эффективности настройки) токовых ступенчатых релейных защит (РЗ) высоковольтных линий, применение данного

критерия для оценки качества работы разных каналов РЗ и наилучшей их настройки.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Изучение характеристик токовых релейных защит.
2. Обзор существующих способов оценки качества функционирования и настройки релейной защиты.
3. Изучение случайного характера процессов функционирования сети и аппаратуры РЗ, выбор и обоснование законов распределения вероятностей электрических величин в рабочих режимах и при коротких замыканиях (КЗ).
4. Применение существующих и разработанных вероятностных методов для определения вероятностных характеристик редкостных событий (отказов срабатывания, излишних и разных видов ложных действий) по вероятностным характеристикам событий-состояний (КЗ, асинхронных, неполнофазных, рабочих режимов, бросков токов намагничивая) с достаточно представительной статистикой.
5. Разработка математических формул и алгоритмов для расчета составляющих технической эффективности каналов токовых РЗ: вероятностей потенциального эффекта и потерь (неправильных действий: ложных, излишних действий и отказов срабатывания).
6. Обобщенный совместный режимно-коммутационный анализ сети и технической эффективности ступенчатых токовых защит линий.
7. Разработка и применение методики и программы для расчетов и оптимизации настройки ступенчатых токовых РЗ.
8. Расчет и оптимизация настройки РЗ реальной линии по полному критерию технической эффективности и его составляющим.

Методы исследования. При проведении работы использованы фундаментальные законы теоретических основ электротехники, методы математического анализа, математической статистики, теории вероятностей, объектно-ориентированного программирования, симметричных составляющих. Для проведения экспериментально-расчетных исследований использовались промышленные программы (АРМ СРЗА, ТКЗ 3000, Дакар-99), математические пакеты (Mathcad, MATLAB) и система программирования Delphi 7.

Достоверность полученных результатов исследований подтверждается строгостью теоретического обоснования, корректным использованием вероятностно-статистических методов, результатами теоретических и практических исследований.

Научная новизна. В работе содержатся следующие новые научные результаты:

1. Предложено в существующей классификации свойств функционирования релейной защиты по надежности, техническому совершенству и эффективности функционирования выделить в последнем частное свойство, названное технической эффективностью, которое определяется режимно-

коммутационными состояниями сети и метрологическими возможностями аппаратуры и позволяет оценить эффективность настройки с использованием вероятностной меры.

2. На основе существующих вероятностно-статистических методов и разработанных формул и алгоритмов сформировано математическое описание критерия технической эффективности и его составляющих (потенциальный эффект и потери отказов срабатывания, излишних и ложных действий) для всех каналов ступенчатых фазных и фильтровых токовых релейных защит.

3. Предложено и обосновано для вычисления законов распределения вероятностей электрических величин использование метода селекции границ интервалов данных и квантилей порядков 0,9987 и 0,0013 искомых нормально распределенных электрических величин при коротких замыканиях, в рабочих и аномальных режимах.

4. Представлен режимно-коммутационный анализ технической эффективности токовой ступенчатой релейной защиты линии в сетевом районе высоковольтных линий, позволивший разработать рекомендации и методику вероятностно-статистической настройки каждой ступени.

Практическая значимость и реализация результатов работы

1. Предложен критерий технической эффективности для оценки эффективности настройки релейной защиты, учитывающий вероятностный характер параметра реагирования.

2. Представлены методика и рекомендации вероятностно-статистического выбора уставок токовых ступенчатых защит, позволяющие повышать эффективность настройки, ускорять и устранять часть рутинных расчетов по согласованиям второй и третьей ступени, а также обосновывать выбор временной уставки резервирующей ступени в сложно-замкнутых сетях с обходными связями.

3. Разработаны алгоритмы и компьютерная программа для расчета технической эффективности токовой защиты нулевой последовательности, реализующие предложенную методику. Программа имеет профессионально-ориентированный интерфейс, позволяет строить графики технической эффективности, посредством которых можно получить область наиболее эффективных уставок и оценить робастность релейной защиты.

4. Методика и программа могут использоваться в вузах электроэнергетического профиля, соответствующих проектных и научно-исследовательских организациях.

5. Проведена апробация разработанного критерия технической эффективности, рекомендаций, методики и программы на реальных объектах Тюменской энергосистемы. Результаты работы использованы в учебном процессе Томского политехнического университета, на предприятии Филиала ОАО «СО ЕЭС» Томское РДУ (подтверждено актами об использовании результатов).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на: Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2008 г., 2010 г.); IV Международной

молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения» (г. Казань, 2009 г.); Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2009-2011 гг.); Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Екатеринбург, 2010 г.).

Публикации. По направлению диссертационной работы автором опубликовано 22 работы, в том числе: 3 статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК; 17 статей в виде материалов докладов конференций; 1 патент на изобретение.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 96 наименований и приложений, содержит 48 рисунков, 11 таблиц. Общий объем диссертации – 179 страниц. Нумерация формул, рисунков и таблиц в данной работе – двухзначная, отдельная для каждой главы (первая цифра указывает номер главы). Условные сокращения расшифровываются по мере их упоминания в тексте.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическое значение полученных результатов.

В первой главе рассмотрена релейная защита, как метрическая система контроля аварийной опасности. Показано, что устройства и системы контроля и управления, в том числе релейная защита и автоматика электроэнергетических систем, в большинстве своем построены по метрологическому принципу, т.е. в структуру этих средств, как правило, входит измерительный орган с непрерывной или релейной проходной характеристикой. По этой причине, при использовании релейных измерительных органов возникает задача определения правильного значения (порога, уставки) параметра реагирования (тока, напряжения, сопротивления, мощности и др.), при котором измерительный орган срабатывает и на своем выходе выдает логический сигнал. В том случае, если уставка была определена неправильно, возникают потери (неправильные действия) релейной защиты: отказы в срабатывании, ложные и излишние действия.

В результате проведенного анализа различных потерь релейной защиты, предложена классификация по причинам их возникновения (таблица 1):

Таблица 1 – Классификация потерь релейной защиты

Характеристика потерь	Принятое название
Непосредственно связанные с уставками и функционированием сети: режимно-коммутационными состояниями, видами КЗ, метрологическими погрешностями измерительной аппаратуры	Функционально-метрологические (без учета погрешностей измерения – функциональные)
Опосредованно связанные с уставками – существенное изменение каналов РЗ и их уставок вследствие: 1) отказов аппаратуры; 2) неправильных операций персонала; 3) непредвиденных (стихийных) воздействий и воздействий внешней среды (электромагнитные помехи, загрязнение, влага и др.)	Функционально-радикальные: 1) конструкторско-схемные; 2) ошибочные; 3) разрушительные.

Характеристика потерь	Принятое название
Не связанные с уставками – повреждение инфраструктуры РЗ (корпуса, аппаратуры) вследствие различных причин (неправильных действий персонала, стихийных воздействий)	Периферийные

Приведенная классификация потерь РЗ, вызванных разными обобщающими причинами, позволила выделить функционально-метрологическую составляющую, обусловленную функционированием сети и метрологией аппаратуры. По статистическим данным, функционально-метрологические потери РЗ составляют 8-40 % от общего числа неправильных действий. Наименее данному виду потерь подвержены токовые дифференциальные РЗ оборудования и дистанционные РЗ линий, для которых благодаря найденным метрологическим решениям (торможение, конфигурация характеристик срабатывания в комплексной плоскости и др.) удалось практически полностью (дифференциальные защиты) или частично (дистанционные РЗ) обеспечить существенную независимость выполняемых функций от режимно-коммутационных условий и видов повреждений в электрической сети. С этой точки зрения, наиболее актуальна оценка функционально-метрологических потерь у ступенчатых РЗ, отдельные каналы которых имеют допущенные потери: отказы быстродействующего срабатывания первой ступени и излишние действия резервирующей ступени при наличии обходных связей и протяженной структурно-радиальной последовательности элементов. Отметим, что данные потери в основном возникают из-за невозможности обеспечить с предельно возможным эффектом одновременного выполнения требований чувствительности и селективности.

Анализ существующих способов оценки качества функционирования РЗ показал, что в существующих подходах учитывается либо совокупность всевозможных потерь (по таблице 1), либо только потери, связанные с отказами аппаратуры. При этом и в том, и в другом случае отмечается трудоемкость соответствующих расчетов. В результате основным показателем качества функционирования РЗ в настоящее время является процент правильных действий (1):

$$\eta = \frac{n_{п.с.}}{n_{п.с.} + n_{о.с.} + n_{и.с.} + n_{л.с.}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $n_{п.с.}$ – число правильных срабатываний; $n_{о.с.}$ – число отказов срабатывания; $n_{и.с.}$ – число излишних срабатываний; $n_{л.с.}$ – число ложных срабатываний.

Однако посредством данного показателя можно вычислить именно процент правильных действий, но не эффективность функционирования РЗ (эффективность функционирования может быть отрицательной, а с использованием выражения (1) мы этого не увидим).

Во второй главе вводятся основные положения по предлагаемому критерию технической эффективности РЗ.

Рассмотренная классификация свойств РЗ с помощью надежности, технического совершенства и эффективности функционирования, предложенная Зейлидзоном Е.Д., Смирновым Э.П. и Федосеевым А.М., полностью учитывает все аспекты функционирования РЗ. Техническая эффективность вводится как

свойство РЗ, определяющееся исключительно функционально-метрологическими потерями РЗ.

Техническая эффективность E_* определяется как отношение технического эффекта E , представляющего собой разность потенциального эффекта (ПЭ) и потерь (П), к потенциальному эффекту:

$$E_* = \frac{E}{\text{ПЭ}} = \frac{\text{ПЭ} - \text{П}}{\text{ПЭ}}. \quad (2)$$

В соответствии с вышеизложенным, техническая эффективность является частным свойством эффективности функционирования в существующей классификации свойств РЗ по Зейлидзону Е.Д., Смирнову Э.П. и Федосееву А.М (рисунок 1).



Рисунок 1 – Иерархия свойств РЗ

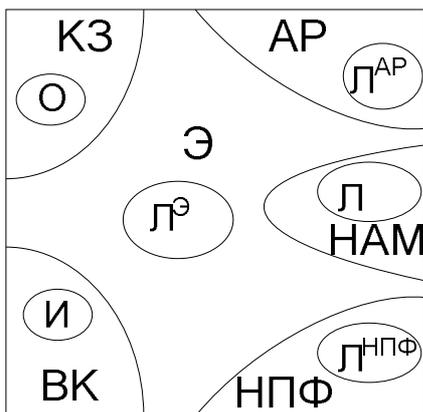


Рисунок 2 – Диаграмма Вьенна событий и условий функционирования релейной защиты

Раскроем свойство технической эффективности. Релейная защита предназначена для фиксации и устранения редких случайных событий коротких замыканий на защищаемых объектах. Возникающие при этом потери П (2) (отказы срабатывания, ложные и излишние действия) являются также случайными. В связи с этим, технический эффект E (2) выражается в виде вероятностных характеристик или показателей. Следовательно, потенциальный эффект ПЭ (2), т.е. то, что должна фиксировать РЗ, а именно, короткие замыкания, должно быть выражено в вероятностной мере состояния КЗ.

Потери эффекта являются существенно более редкими по сравнению с потенциальным эффектом. Поэтому прямое определение вероятностей потерь (статистическим путем) является статистически непредставительным. В то же время данные события происходят совместно с другими более представительными событиями и составляют долю (условную вероятность) от этих событий. Например, отказ в срабатывании происходит при КЗ, которое является представительным событием.

В теории вероятностей вероятности редких событий находят как произведения вероятности базового представительного события на условную вероятность редкого события, если последняя может быть найдена или назначена на основании знания сущности предмета:

$$p(C_{ред}) = p(C_{ред} / C_{пр}) \cdot p(C_{пр}), \quad (3)$$

где $C_{ред}$ – редкостное событие, $C_{пр}$ – представительное событие, p – вероятность события.

В соответствии с вышесказанным и приведенной на рисунке 2 диаграммой Вьенна событий и условий функционирования РЗ, выражение (2) раскрывается через вероятности соответствующих событий (4):

$$E = p(KЗ) - p(O) - p(L^o) - p(L^{ap}) - p(L^{нпф}) - p(L^{нам}) - p(I) = \\ p(KЗ) - p(O/KЗ)p(KЗ) - p(L^o/\text{Э})p(\text{Э}) - p(L^{ap}/AP)p(AP) - p(L^{нпф}/НПФ)p(НПФ) - \\ - p(L^{нам}/НАМ)p(НАМ) - p(I/ВК)p(ВК) \quad (4)$$

На диаграмме (рисунок 2) и в выражении (4) приняты следующие обозначения: КЗ, О, L^o , L^{ap} , $L^{нпф}$, $L^{нам}$, И, ВК – соответственно события потенциального эффекта (обнаружения КЗ), отказов в срабатывании (О), ложных действий в эксплуатационном режиме (индекс «э»), ложных действий в асинхронном режиме (индекс «ар»), ложных действий в неполнофазном режиме (индекс «нпф»), ложных действий при бросках токов намагничивания (индекс «нам»), излишних действий (И), внешних КЗ (ВК). Данные события в этом выражении учтены соответствующими вероятностями и представлены как произведения соответствующих условных и безусловных вероятностей по формуле (3). Формула (3), примененная для определения вероятностей редких событий, является базовой в теории вероятностей. Однако качество этой формулы для вероятностей редкостных событий потерь РЗ отмечено в данной работе впервые в связи с тем, что разработан метод селекции границ интервалов исходных и выходных данных (СГИД), позволяющий для любых функциональных зависимостей определять законы распределения вероятностей (ЗРВ) результата функциональной зависимости любой размерности (например, тока КЗ) по ЗРВ аргументов этой зависимости (параметров нагрузочных и генераторных узлов и др.) и тем самым рассчитать необходимые условные вероятности.

Метод СГИД основан на логическом предположении, состоящем в том, что если значения всех аргументов функциональной зависимости задать равновероятными, то результат применения функциональной зависимости к этим аргументам будет иметь ту же вероятность, что и аргументы, т.к. при функциональной обработке аргументов степень неопределенности или случайности результата останется той же. Как показал анализ, метод СГИД дает в его приближенной практической версии с использованием функции распределения вероятностей (ФРВ) наиболее точный результат в хвостовых частях закона распределения вероятностей в виде ФРВ или плотности распределения вероятностей (ПРВ). В случае известного ЗРВ названные хвостовые части в виде квантилей больших (близких к единице) и малых (близких к нулю) порядков могут использоваться для нахождения параметров этих ЗРВ. В настоящей работе используется нормальный закон распределения, который для необходимых

электрических величин (токов и их симметричных составляющих, потоков мощности, нагрузок) достаточно хорошо обуславливается центральной предельной теоремой математической статистики. Тогда в соответствии с «правилом трех сигма» можно показать, что параметры нормального закона распределения для искомой электрической величины X вычисляются через симметричные относительно центра нормального ЗРВ квантили x_{p1} и x_{p2} порядков $p1=0,9987$ и $p2=0,0013$ по выражениям (5):

$$\begin{cases} m(X) = \frac{x_{p1} + x_{p2}}{2} \\ \sigma(X) = \frac{x_{p1} - x_{p2}}{6} \end{cases}, \quad (5)$$

где $m(X)$ и $\sigma(X)$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение искомой случайной величины X (здесь и далее случайная величина обозначается прописной буквой, ее значение – строчной).

Таким образом, нормальный ЗРВ электрических величин и применение метода СГИД на основе квантилей порядков 0,9987 и 0,0013 обуславливает достаточную для практических целей настоящей работы точность определения ЗРВ.

Сформулированные базовые положения критерия технической эффективности служат основой для разработки математического описания технической эффективности различных РЗ и для достижения цели работы последнее должно быть сделано для токовых РЗ.

В третьей главе приведено подробное математическое описание технической эффективности ступеней токовой защиты нулевой последовательности (ТЗНП). Приведенные вероятностно-статистические формулы и алгоритмы, с учетом отмеченных особенностей, можно использовать также для расчета технической эффективности токовых защит, реагирующих на фазные величины.

Рассмотрим расчетные формулы и алгоритмы определения некоторых вероятностей выражения (4) для основных ступеней (I, II, III) ТЗНП.

Вероятность повреждения объекта (обнаружения короткого замыкания релейной защитой) $p(KЗ^j)$ для рассчитываемого j -го канала ТЗНП определяется выражением (6):

$$p(KЗ^j) = \omega^{KЗ} m(T^j), \quad (6)$$

где $m(T^j)$ – математическое ожидание времени действия рассчитываемого канала РЗ. Параметр потока КЗ на защищаемом объекте $\omega^{KЗ}$ для защиты, реагирующей на замыкания на землю, равен

$$\omega^{KЗ} = \omega^{(1,4)} = [p(1)+p(4)] \cdot \omega_{уд} \cdot \frac{L}{100}, \quad (7)$$

где $p(1)$ – вероятность однофазного КЗ по статистическим данным; $p(4)$ – вероятность двухфазного КЗ на землю по статистическим данным; L – длина автоматизируемой линии; $\omega_{уд}$ – удельный параметр потока устойчивых и неустойчивых замыканий на землю.

тойчивых повреждений на 100 км длины линии, принимается по справочным данным исходя из класса напряжения, материала опор и числа цепей.

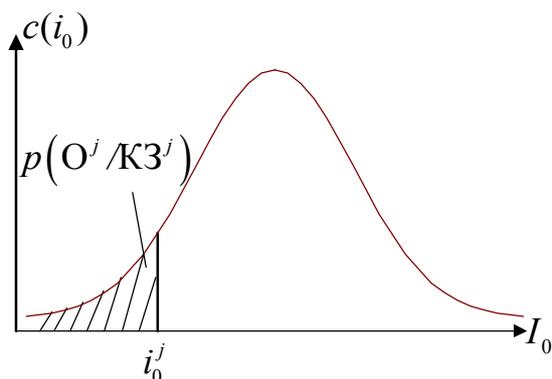


Рисунок 3 – Определение условной вероятности отказа защиты при КЗ на линии $p(O^j / KЗ^j)$: i_0^j – уставка рассматриваемого канала РЗ j ; $c(i_0)$ – ПРВ токов КЗ нулевой последовательности

Вероятность отказа в срабатывании $p(O^j)$ вычисляется по выражению:

$$p(O^j) = p(O^j / KЗ^j) p(KЗ^j). \quad (8)$$

Соответственно, определение данной вероятности сводится к расчету условной вероятности отказа при повреждении $p(O^j / KЗ^j)$. При нормальном ЗРВ данная вероятность определяется через ФРВ $f(i_0)$:

$$p(O^j / KЗ^j) = f(i_0^j) = 0,5 + \Phi \left[\frac{i_0^j - m(I_0)}{\sigma(I_0)} \right], \quad (9)$$

где Φ – функция Лапласа; математическое ожидание $m(I_0)$ и

среднеквадратическое отклонение $\sigma(I_0)$ для задания ФРВ $f(i_0)$ вычисляются в соответствии с (5) системой (10):

$$\begin{cases} m(I_0) = \frac{i_{0p1} + i_{0p2}}{2} \\ \sigma(I_0) = \frac{i_{0p1} - i_{0p2}}{6} \end{cases}, \quad (10)$$

где i_{0p1} , i_{0p2} – квантили порядков $p1$ и $p2$ токов нулевой последовательности, вычисляемые по указанным в четвертой главе рекомендациям и в соответствии с методом СГИД по заданным квантилям порядков $p1$ и $p2$ исходных данных нагрузочных и генераторных узлов. Наглядное представление вероятности $p(O^j / KЗ^j)$ дано на рисунке 3.

Условная вероятность ложного срабатывания ступени при асинхронном режиме $p(L^{ap} / AP)$ определяется небалансом на выходе фильтра нулевой последовательности, который возникает при токах AP. Безусловная вероятность $p(AP) = \omega^{ap} m(T^{алар})$ определяется параметром потока асинхронного режима ω^{ap} , обратно пропорционального средней продолжительности между правильными срабатываниями автоматики ликвидации асинхронного режима (АЛАР), и математическим ожиданием времени действия АЛАР $m(T^{алар})$, которое достаточно точно можно принять исходя из используемого вида АЛАР: 1) быстродействующие неселективные устройства, не допускают достижения расхождения угла ЭДС до 180 градусов – 0,1 с; 2) устройства, действующие при возникновении признаков нарушения синхронизма или в течение первого цикла асинхронного режима – 0,55-0,8 с; 3) устройства, осуществляющие ресинхронизацию и действующие после нескольких циклов асинхронного режима – 1-20 с.

Условная вероятность ложного срабатывания ступени в неполнофазном режиме $p(\text{Л}^{\text{нпф}j}) = p(\text{Л}^{\text{нпф}j}/\text{НПФ})p(\text{НПФ})$ определяется аналогично отказам при КЗ. Для задания ПРВ используются квантили порядков 0,9987 и 0,0013 тока нулевой последовательности неполнофазного режима, вычисленные методом СГИД. Безусловная вероятность неполнофазного режима $p(\text{НПФ})$ определяется параметром потока неполнофазного режима, численно равного доле однофазных КЗ от $\omega^{\text{КЗ}}$, и математическим ожиданием времени действия автоматики однофазного повторного включения.

Условная вероятность ложных действий ступени в эксплуатационном режиме $p(\text{Л}^j/\text{Э}^j)$ вычисляется аналогично асинхронному режиму через ПРВ небаланса нулевой последовательности, возникающего при рабочих токах. Безусловная вероятность эксплуатационного режима $p(\text{Э}^j)$ определяется по выражению:

$$p(\text{Э}^j) = 1 - p(\text{КЗ}^j) - p(\text{АП}) - p(\text{НПФ}) - p(\text{НАМ}) - p(\text{ВК}^j). \quad (12)$$

Вероятность излишнего срабатывания ступени $p(\text{И}^j)$ определяется как сумма излишних действий при КЗ на предыдущих в направлении действия РЗ элементах (12):

$$p(\text{И}^j) = \sum_{n=1}^{n_n} p(\text{И}_n/\text{ВК}_n)p(\text{ВК}_n), \quad (13)$$

где нижний индекс «п» означает соответствующий элемент первой периферии (рисунок 4), число которых n_n .

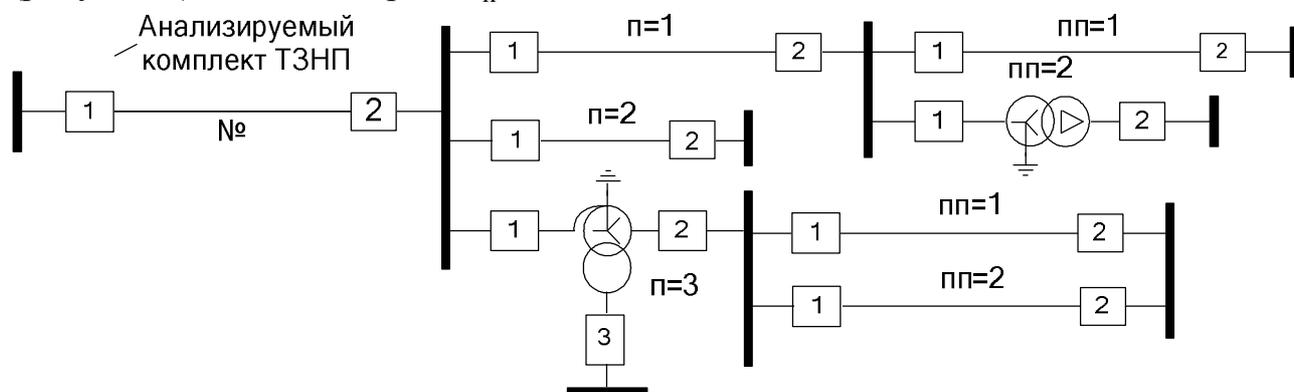


Рисунок 4 – Фрагмент электрической сети: символом «№» обозначен защищаемый объект, буквой «п» – предыдущие элементы (элементы первой периферии), буквами «пп» – предыдущие к предыдущим элементам (элементы второй периферии), цифрами «1» и «2» обозначены комплекты РЗ на концах элементов

Излишние действия возникают при взаимодействии рассчитываемой ступени РЗ с сонаправленными ступенями предыдущих элементов. Для этого рассматриваются ЗРВ токов КЗ нулевой последовательности через сонаправленные комплекты РЗ предыдущих элементов (обозначены цифрой 1 на рис. 4). Данные ЗРВ определяются аналогично ЗРВ токов КЗ через рассчитываемый элемент по системе (5): ФРВ для предыдущего п-го элемента $f_n(i_{0n})$.

Тем самым вероятность излишних действий определяется положением уставки рассматриваемого канала РЗ i_0^j , приведенной с помощью коэффициента токораспределения k_{Π} к токам КЗ нулевой последовательности через комплект РЗ предыдущей линии, с которым рассматривается взаимодействие (i_0^j / k_{Π}). Область излишних действий формируется через контролируемые анализируемым каналом РЗ области действия и недействия (отказов) предыдущего комплекта РЗ, характеризуемые условными вероятностями $p(D_{\Pi}/BK_{\Pi}^{II})$ и $p(O_{\Pi}/BK_{\Pi}^{II})$ соответственно.

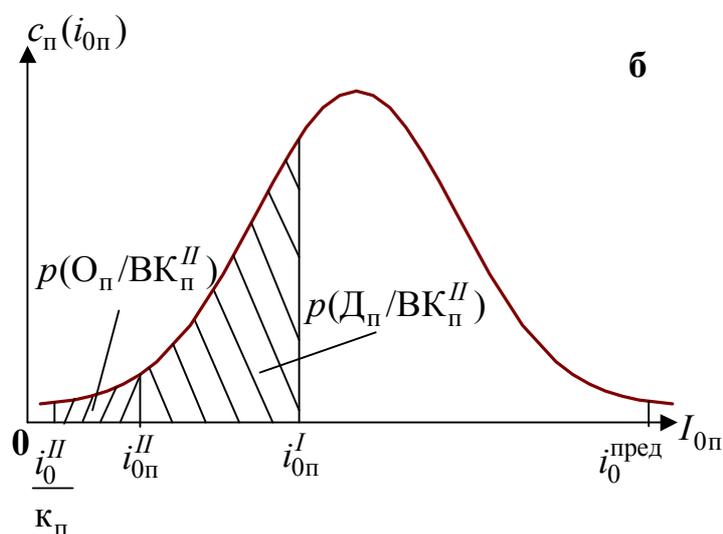
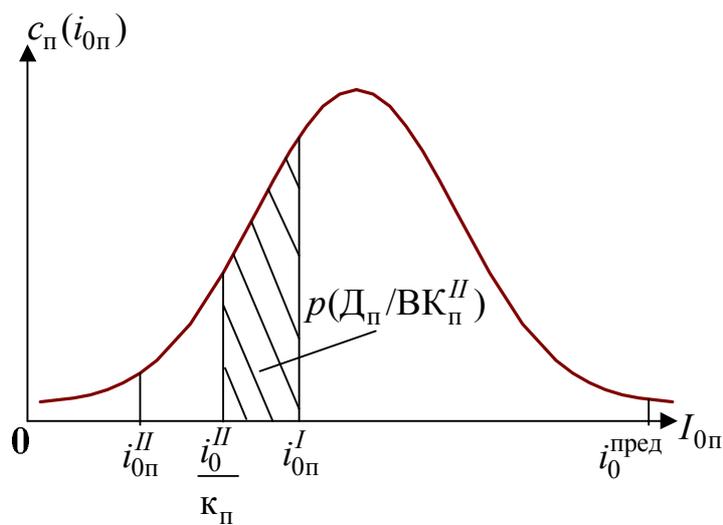


Рисунок 5 – К определению условной вероятности излишних действий второй ступени $p(I_{\Pi}^{II}/BK_{\Pi}^{II})$ при КЗ на предыдущем элементе с индексом «П»

ПРВ нормального закона. Сказанное иллюстрируется рисунком 5.

Таким образом, условная вероятность излишних действий второй ступени определяется нижеприведенным алгоритмом.

$$p(I_{\Pi}^{II}/BK_{\Pi}^{II}) = 0,5p(D_{\Pi}/BK_{\Pi}^{II}) + p(O_{\Pi}/BK_{\Pi}^{II}), \quad (13)$$

В соответствии с выше-сказанным, рассмотрим формирование излишних действий для второй ступени. Для последней имеем 3 случая, определяемых соотношением уставок данной ступени и взаимодействующих с ней ступеней. Вторая ступень взаимодействует с одновременной второй ступенью предыдущего комплекта ТЗНП (уставка $i_{0\Pi}^{II}$) и более быстродействующей первой ступенью предыдущего комплекта ТЗНП (уставка $i_{0\Pi}^I$). При этом если приведенная уставка рассчитываемой второй ступени больше уставки первой ступени предыдущего комплекта, излишние действия отсутствуют, т.к. более быстродействующая ступень предыдущего комплекта сработает первой. Излишние действия также отсутствуют, если рассматриваемая уставка превышает максимальный ток КЗ предыдущей линии $i_0^{\text{пред}}$, который ограничивает кривую

- если $\frac{i_0^{II}}{K_{II}} > i_0^{\text{пред}}$ или $\frac{i_0^{II}}{K_{II}} > i_{0II}^I$, то $p(D_{II} / BK_{II}^{II}) = 0$, $p(O_{II} / BK_{II}^{II}) = 0$;
- если $i_{0II}^{II} \leq \frac{i_0^{II}}{K_{II}} < i_{0II}^I$, то $p(D_{II} / BK_{II}^{II}) = f_{II}(i_{0II}^I) - f_{II}\left(\frac{i_0^{II}}{K_{II}}\right)$, $p(O_{II} / BK_{II}^{II}) = 0$
(рисунок 5, а);
- если $\frac{i_0^{II}}{K_{II}} < i_{0II}^{II}$, то $p(D_{II} / BK_{II}^{II}) = f_{II}(i_{0II}^I) - f_{II}(i_{0II}^{II})$,
 $p(O_{II} / BK_{II}^{II}) = f_{II}(i_{0II}^{II}) - f_{II}\left(\frac{i_0^{II}}{K_{II}}\right)$ (рисунок 5, б).

Коэффициент 0,5 в выражении (13) обусловлен равной вероятностью действия равноновременных вторых ступеней защищаемого и предыдущего элемента.

Безусловная вероятность излишних действий определяется аналогично выражению (6), с одним отличием. Параметр потока внешних коротких замыканий вычисляется в соответствии с захватываемым рассчитываемой ступенью пространством предыдущей линии, КЗ на котором может привести к излишним действиям.

Таким путем рассчитываются вероятности излишних действий при КЗ на всех предыдущих линиях, которые затем суммируются по выражению (13).

Расчет технической эффективности резервирующей ступени имеет ряд особенностей, обусловленных назначением данной ступени: обеспечением ближнего и дальнего резервирования. В связи с этим, излишними действиями для данной ступени являются действия при КЗ на второй периферии, а отказы определяются как при КЗ на основном защищаемом элементе, так и при КЗ на элементах первой периферии.

Таким образом, из разработанного математического описания технической эффективности следует, что предлагаемое свойство технической эффективности позволяет как оценить качество настройки токовых релейных защит (в диапазоне от отрицательных значений до 1 о.е. или 100 %), так и может являться критерием выбора оптимальной уставки. При этом критерием поиска наилучшей уставки может быть не только максимальное значение технической эффективности, но и ее составляющие: минимум вероятности потерь или их части (минимумы вероятностей излишних действий, отказов в срабатывании, ложных действий в разных режимах). Необходимо также отметить, что на процесс поиска оптимальной уставки метрология аппаратуры РЗ не оказывает существенного влияния, т.к. погрешности измерения носят преимущественно симметричный характер (поэтому влияют только на дисперсию используемого ЗРВ, а математическое ожидание от них не зависит).

На основе совместного режимно-коммутационного анализа токов при КЗ и показателей технической эффективности разработана методика настройки токовых ступенчатых защит, включающая в себя 4 варианта настройки основных ступеней и вариант настройки резервирующей ступени.

Вариант 1. На коротких предыдущих (предыдущие в направлении действия РЗ) линиях (с индексом «п» на рисунке 4) устанавливаются РЗ с обменом информацией между комплектами на концах этих линий (РЗ с абсолютной селективностью). В этом случае нет необходимости согласовывать вторые ступени защищаемых линий с РЗ коротких предыдущих линий. Это позволяет иметь большую чувствительность второй ступени. Если вообще согласование с РЗ предыдущих линий устранить и уставку второй ступени выбрать по чувствительности, то настройка второй ступени на этом завершается, имеет место гарантированная чувствительность второй ступени. При этом, однако, необходимо оценить вероятность излишних действий при КЗ на линиях, где отсутствует РЗ с обменом информацией между комплектами. Объем этих излишних действий в первую очередь может складываться при КЗ в зонах пространства предыдущих электрически более коротких линий.

Вариант 2. На всех линиях сети установлены РЗ с абсолютной селективностью. Вторые ступени при этом являются резервирующими для РЗ с абсолютной селективностью. Уставки таких ступеней однозначно выбираются исходя из чувствительности или максимума технической эффективности.

Вариант 3. Вторые ступени выбираются по чувствительности, а первые – по существующему экспертно-руководящему методу (ЭРМ). При этом уставки вторых ступеней оптимизируются для обеспечения минимальной вероятности излишних действий.

Вариант 4. Вторые ступени выбираются по чувствительности, а первые – по максимуму технической эффективности, что обеспечивает снижение потерь быстродействующего срабатывания первой ступени.

Выбор конкретного варианта производится исходя из технических и экономических возможностей его реализации.

Вариант настройки резервирующей ступени на основе оценки вероятности излишних действий и технической эффективности в целом позволяет обосновать выбор временной уставки резервирующей ступени в сетях с протяженной структурно-радиальной последовательностью элементов или с обходными связями, когда встречно-ступенчатый принцип выдержки времени приводит к недопустимо большим временным уставкам или не позволяет однозначно их определить.

В материалах **четвертой главы** представлена разработанная компьютерная программа RPTEC (Relay Protection Technical Efficiency Calculation – Расчет технической эффективности релейной защиты), для реализации всех расчетов по технической эффективности и представленной методики настройки. Программа разработана в интерактивном виде (рисунок 6).

Как следует из приведенной структуры (рисунок 6), проектировщик (расчетчик уставок РЗ) использует сторонние программные продукты (АРМ СРЗА, ТКЗ 3000, Евростаг, Мустанг и др.) и аппаратные комплексы (RTDS, ВМК РВ ЭЭС) для расчета электрических величин, которые затем используются в качестве исходных данных для вероятностных расчетов по программе RPTEC.



Рисунок 6 – Структура взаимодействия

Сервис разработанной программы предоставляет следующие возможности: 1. Создание, сохранение, редактирование, загрузку базы данных и графического изображения

рассчитываемой схемы. 2. Расчет технической эффективности для заданной уставки. 3. Определение оптимальной уставки исходя из максимума технической эффективности или минимума потерь. 4. Построение графика технической эффективности как функции от уставки. 5. Детализация расчетов, включающая в себя подробный отчет по всем вероятностным составляющим технической эффективности с графическим комментарием их определения. 6. Инструментарий для исследований технической эффективности РЗ.

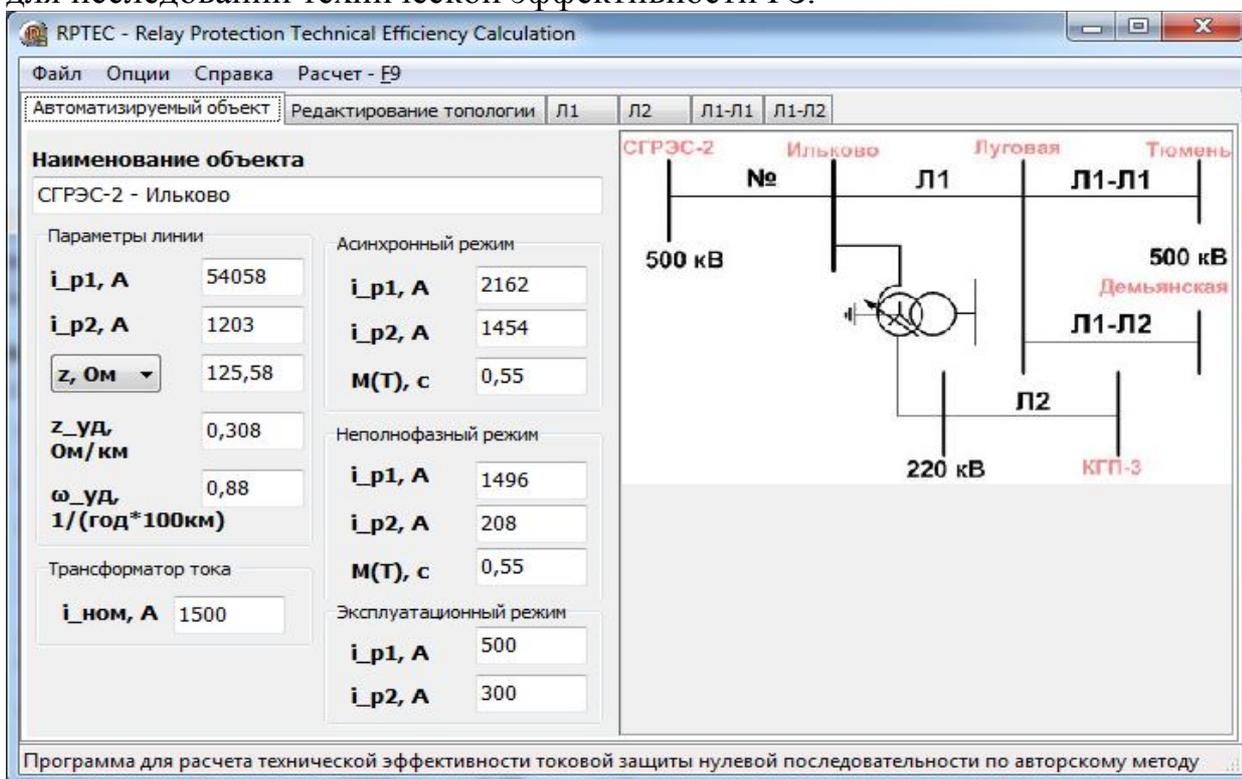


Рисунок 7 – Главная форма программы RPTES

На главной форме программы (рисунок 7), состоящей из нескольких вкладок (количество которых определяется топологией сети), осуществляется ввод исходных данных. Для перехода в режим расчетов достаточно выбрать в меню команду «Расчет – F9», что активирует соответствующую форму (фрагмент формы приведен на рисунке 11).

Разработанное математическое обеспечение, алгоритмы и программа расчета технической эффективности позволяют строить графики технической эффективности канала релейной защиты в зависимости от его настройки (уставки). Это позволяет впервые ставить и решать следующие задачи:

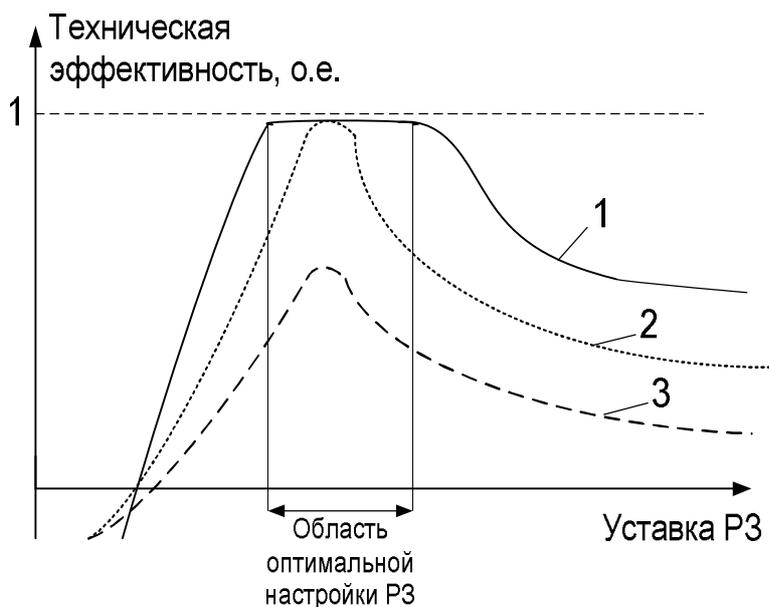


Рисунок 8 – Виды кривых технической эффективности: 1 – кривая соответствует технической эффективности для защит, естественно адаптированных к сетевой инфраструктуре; 2 – кривая для слабо-адаптированных защит; 3 – кривая для неадаптированных защит.

селективность, но меньшую чувствительность, и, наоборот, большую чувствительность, но меньшую селективность для защит, обладающих достаточной степенью робастности (вдоль области оптимальной настройки РЗ).



Рисунок 9 – График технической эффективности в зависимости от уставки для первой ступени

линии 500 кВ СГРЭС-2 – ПС Ильково Тюменской энергосистемы со стороны СГРЭС-2. Топология анализируемого района приведена на рисунке 7. Линии Л1 и Л2 отнесены к линиям первой периферии (для учета вероятности излишних действий основных ступеней на данных линиях), линии Л1-Л1 и Л1-Л2 являются линиями второй периферии. Требуемые входные данные получены в программах ТКЗ 3000 (токи КЗ) и Дакар-99 (токи установившихся режимов). Часть входных данных представлена на рисунке 7.

Выбранные по руководящим указаниям токовые уставки ТЗНП первой, третьей и четвертой ступени соответственно: $i_0^I = 2292$ А, $i_0^{III} = 896$ А, $i_0^{IV} = 127$ А. Уставка второй ступени не определена, т.к. не выполнено требование чувствительности. Согласно ЭРМ, данная ступень должна быть выведена из работы. В работе проведены исследования данного комплекта РЗ, а для второй ступени принята уставка исходя из максимума технической эффективности.

1. Оценивать степень адаптированности, т.е. пригодности РЗ к работе на данном элементе сети. Можно выделить три характерных типа кривых технической эффективности, согласно рисунку 8.

2. Оценивать степень робастности. Робастность определяется диапазоном высокоэффективных уставок. Чем больше данный диапазон (область оптимальной настройки на рисунке 8), тем робастнее защита.

3. Объективно назначать уставку защиты, обеспечивающую большую

В пятой главе приведена практическая реализация результатов исследований на примере расчета и анализа токовой защиты нулевой последовательности ли-

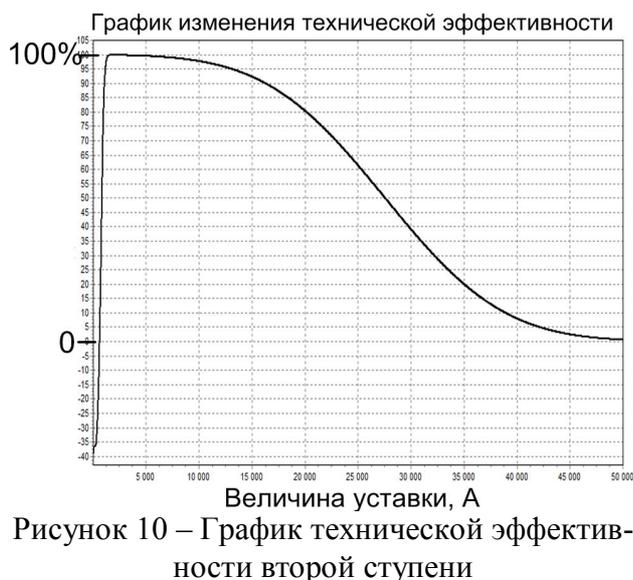


Рисунок 10 – График технической эффективности второй ступени

ОТЧЕТ ПО ВЫЧИСЛЕННОЙ ОПТИМАЛЬНОЙ УСТАВКЕ	
УСТАВКА	1706
Техн. эффективность, ----- %	99,8254135305
Техн. эффект	5,30968259773E-08
Потенц. эффект ---- р(КЗ_Сумм)	5,31896879756E-08
Потери ----- р(П)	9,28619983946E-11
Отказы при КЗ на эл. № р(О_№)	9,12152239342E-11
Усл. отказы на эл.№ р(О/КЗ_№)	0,00171490428701
КЗ на анализ. элементе р(КЗ_№)	5,31896879756E-08
Ложн. АР ----- р(Л_АР)	0
Усл. ложн. АР ---- р(Л_АР/АР)	0
Асинхр. режим ----- р(АР)	1,61485051769E-09
Ложн. НПФ ----- р(Л_НПФ)	1,64677446039E-12
Усл. ложн. НПФ р(Л_НПФ/НПФ)	3,75947815827E-05
Неполноф. режим ----- р(НПФ)	4,38032724505E-08
Ложн. эксп ----- р(Л_Э)	0
Усл. ложн. эксп ----- р(Л_Э/Э)	0
Эксплуат. режим ----- р(Э)	0,999999901392

Рисунок 11 – Оптимальная уставка второй ступени исходя из максимума технической эффективности

Как следует из графиков технической эффективности в зависимости от уставки (рисунки 9-10), области оптимальной настройки первой и второй ступени лежат соответственно в диапазонах (900; 6000) А и (1600; 1800) А. Заметим, что диапазон оптимальной настройки первой ступени значительно шире аналогичного диапазона второй ступени. Вычисленная по ЭРМ уставка первой ступени находится в данной области.

Вторая ступень в соответствии с рисунками 8 и 10 является слабо-адаптированной, т.к. подвержена случайным помехам, ее настройка проблематична в связи с невозможностью обеспечения однозначных согласований, отстроек и чувствительности. В этих условиях детерминированный ЭРМ не может дать объективную настройку.

Расчет уставки второй ступени по критерию технической эффективности приведен на рисунке 11. Вычисленная уставка – 1706 А – характеризуется технической эффективностью 99,8254135305. Коэффициент чувствительности при этом равен $\frac{1203}{1706} = 0,705$.

Заметим, что коэффициент чувствительности проверяется для минимального маловероятного режима (характеризуется квантилем порядка 0,0013 тока нулевой последовательности при КЗ в конце линии, равным 1203 А), поэтому проверка коэффициентом чувствительности напрямую не отражает эффективность защиты. Т.е. коэффициент чувствительности, равный в данном случае 0,705, не означает, что эффективность равна 70,5 % (техническая эффективность указана выше).

В заключении сформулированы основные результаты выполненных исследований и разработок, позволившие достичь поставленную в диссертации цель:

1. Разработана классификация потерь РЗ, вызванных разными обобщающими причинами, влияющими на работу РЗ, которая позволила выделить функционально-метрологическую составляющую, обусловленную функционированием сети и метрологической погрешностью аппаратуры, и которая непосредственно связана с уставками.

2. Введено свойство технической эффективности, описывающее функционально-метрологическую составляющую потерь в рамках обобщающего и полного свойства эффективности функционирования, отображающего высшее свойство РЗ в иерархии от надежности через техническое совершенство к эффективности функционирования. Предложенный критерий технической эффективности, в отличие от обобщающего критерия эффективности функционирования, позволяет непосредственно производить выбор и обоснование уставок каналов РЗ.

3. Учитывая случайный характер режимов и процессов в электроэнергетических системах, явная форма технической эффективности, в виде отношения разности потенциального эффекта и потерь к потенциальному эффекту, может быть представлена в двух вероятностных мерах: вероятностей интересующих событий (отказов в срабатывании, ложных и излишних действий, коротких замыканий) или параметров потоков их совершения. Ввиду того, что вероятность учитывает интересующие состояния после действия событий (через математическое ожидание времени нахождения в каждом состоянии), она является более полной и поэтому предпочтительной к использованию характеристикой.

4. Установлено, что вероятности редких событий неправильных действий релейной защиты могут быть вычислены через их совмещения с достаточно статистически представительными событиями, как произведения соответствующих условных вероятностей потерь на вероятности представительных состояний. Благодаря применению разработанного прикладного метода селекции границ интервалов данных, условные вероятности событий могут быть рассчитаны практически точно. Данный подход обеспечивает учет режимно-коммутационных состояний и инфраструктуры сети, где установлена рассчитываемая защита. Таким образом, проблема вычисления вероятностей редких событий в настоящей работе оказалась решенной при расчете технического эффекта, технической эффективности и их составляющих.

5. Кривые технической эффективности каналов релейной защиты в зависимости от уставок позволяют объективно оценить целесообразность использования данного вида РЗ на автоматизируемом объекте. По наличию области уставок, обеспечивающих высокую техническую эффективность (близкую к 100 % или 1 о.е.), можно судить о робастности канала РЗ и произвести обоснованный выбор уставки исходя из требований селективности и чувствительности.

6. Предложенная методика выбора уставок вторых и третьих ступеней, позволяет устранить часть рутинных расчетов по их согласованиям с предыдущими ступенями линий, и тем самым значительно сократить трудовые и временные затраты проектировщиков. При обосновании выбора уставок по

данной методике используется полный критерий технической эффективности или его составляющие (преимущественно вероятность излишних действий).

7. Использование критерия технической эффективности позволяет обосновать выбор временной уставки резервирующей ступени в сложно-замкнутых сетях с протяженными структурно-радиальными последовательностями элементов и обходными связями, когда существующим путем это сделать не удастся (выбор временной уставки по встречно-ступенчатому принципу приводит к недопустимо большой величине или вовсе невозможен при наличии обходных связей в сети).

8. Разработанная в соответствии с объектно-ориентированной парадигмой программирования компьютерная программа РРТЕС позволяет производить все требуемые вероятностно-статистические расчеты. Ее использование совместно с существующими промышленными программами и комплексами расчета коротких замыканий и моделирования электроэнергетических систем позволяет ставить и решать задачи связанные с оценкой эффективности настройки каналов токовой защиты нулевой последовательности и оптимизацией настроек с помощью критерия технической эффективности (расчет технической эффективности для ступени РЗ, настроенной по стандартному или любому другому методу, построение кривых технической эффективности в зависимости от уставок, поиск оптимальных уставок исходя из максимума технической эффективности или минимума суммы потерь и отдельных составляющих данных потерь и др.).

9. Проведена апробация разработанных: математического описания технической эффективности, критерия технической эффективности для оценки функционирования ступеней токовой защиты нулевой последовательности и выбора их уставок, предлагаемой методики настройки РЗ. Установлено, что существующий экспертно-руководящий метод настройки токовых РЗ дает наилучший результат при наличии области оптимальных уставок, оцениваемой по графику технической эффективности (уставки, обеспечивающие эффективность близкую к 100 %). В других случаях, когда данная область имеет небольшой диапазон, имеются затруднения, связанные со сложностью и неоднозначностью выбора максимальных и минимальных режимов для обеспечения селективности и проверки чувствительности соответственно. Данное затруднение может быть преодолено с помощью разработанного критерия технической эффективности. Так, было показано, что вторую ступень ТЗНП линии 500 кВ СГРЭС-2 – Ильково, которая не может быть однозначно выбрана по экспертно-руководящему методу, можно настроить по предлагаемому критерию на величину 1706 А с технической эффективностью 99,7881744118 %.

В приложениях представлены схема электрических соединений и совмещенная схема прямой, обратной, нулевой последовательности анализируемого района линии 500 кВ СГРЭС-2 – ПС Ильково Тюменской энергосистемы; 2 акта использования результатов диссертационной работы.

Наиболее значимый материал, связанный с выполнением диссертационной работы, и ее основное содержание отражены в следующих **публикациях**, расположенных в хронологическом порядке:

1. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Алгоритм оценки технической эффективности средств релейной защиты и автоматики // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Специальный выпуск. – 2009. – № 1. – С. 192-195. (Всего объем 0,25 п.л., лично автором – 0,14 п.л.)

2. Prutik A.F., Shmoylov A.V. Setting-up algorithms of relay protection // Proceedings of The International Forum on Strategic Technologies (IFOST 2009) – Ho Chi Minh City, Vietnam, October 21-23, 2009. – Ho Chi Minh City: Ho Chi Minh City University of Technology, 2009. – S.4. – p. 45-50.

4. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Развитие вероятностного метода селекции границ интервалов данных для задач электроэнергетики // Энергетика: экология, надежность, безопасность: материалы пятнадцатой Всероссийской научно-технической конференции / Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 264 с. – С. 36-38. (Всего объем 0,1875 п.л., лично автором – 0,1875 п.л.)

5. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Разработка алгоритмов и программ для настройки и оценки технической эффективности релейной защиты // Электричество. – 2009. – №12. – С. 19-26. (Всего объем 0,5 п.л., лично автором – 0,3 п.л.)

6. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Алгоритм оценки технической эффективности дифференциальной токовой защиты. Электрические станции. – 2009. – №12. – С. 30-36. (Всего объем 0,4375 п.л., лично автором – 0,3 п.л.)

8. Прутик А.Ф., Чан Хоанг Куанг Минь, Шмойлов А.В. Функционирование и настройка метрологической релейной защиты // Материалы шестнадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 321 с. – С. 55-63. (Всего объем 0,5625 п.л., лично автором – 0,22 п.л.)

9. Прутик А.Ф., Чан М., Шмойлов А.В. Селективность и техническая эффективность релейной защиты и автоматики // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3-4/1. – С. 154-164. (Всего объем 0,4375 п.л., лично автором – 0,2 п.л.)

10. Пат. № 2435267 РФ, МПК H02H 3/00. Способ построения и настройки релейной защиты с высокочастотным обменным блокирующим сигналом по проводам линии // А.В. Шмойлов, А.Ф. Прутик; заявитель и патентообладатель «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; – № 2010136422/07; заявл. 30.08.2010; опубл. 27.11.2011. Бюл. № 33. – 12 с. (доля автора – 40 %)

12. Прутик А.Ф. Исследование надежности, технического совершенства и эффективности релейной защиты, как критериев оценки качества функционирования // Материалы семнадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 409 с. – С. 62-66. (Всего объем 0,3125 п.л., лично автором – 0,3125 п.л.)

Кроме этого, различные аспекты и фрагменты диссертационной работы отражены в других 12 публикациях.