

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

---

**Прутик Алексей Федорович**

**Вероятностно-статистический критерий эффективности настройки  
токовых релейных защит и методика ее повышения**

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
**Шмойлов Анатолий Васильевич**

Томск – 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                      | 4  |
| ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ТОКОВЫХ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ .....     | 13 |
| 1.1 Релейная защита, как метрическая система контроля аварийной опасности .....                                     | 13 |
| 1.1.1 Дифференциальный принцип релейной защиты .....                                                                | 18 |
| 1.1.2 Ступенчатый принцип релейной защиты .....                                                                     | 20 |
| 1.2 Потери функционирования релейной защиты .....                                                                   | 23 |
| 1.3 Существующие способы оценки качества функционирования релейной защиты .....                                     | 27 |
| 1.3.1 Исследование способов определения надежности, технического совершенства и эффективности релейной защиты ..... | 28 |
| 1.3.2 Вероятностный подход для оценки характеристик и настройки релейной защиты .....                               | 37 |
| 1.4 Выводы по главе .....                                                                                           | 40 |
| ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КРИТЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ .....                                 | 43 |
| 2.1 Представление технического эффекта через вероятностные меры .....                                               | 44 |
| 2.2 Метод селекции границ интервалов данных для вычисления законов распределения вероятностей .....                 | 51 |
| 2.3 Нормальный закон распределения вероятностей .....                                                               | 54 |
| 2.4 Выводы по главе .....                                                                                           | 57 |
| ГЛАВА 3. КРИТЕРИЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ТОКОВЫХ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ И МЕТОДИКА ВЫБОРА УСТАВОК .....              | 59 |
| 3.1 Техническая эффективность для основных ступеней токовой защиты нулевой последовательности .....                 | 61 |
| 3.1.1 Вероятность повреждения объекта (потенциальный эффект) .....                                                  | 61 |
| 3.1.2 Вероятность отказа в срабатывании .....                                                                       | 62 |
| 3.1.3 Вероятность ложного срабатывания ступени в асинхронном режиме .....                                           | 64 |
| 3.1.4 Вероятность ложного срабатывания ступени в неполнофазном режиме .....                                         | 67 |
| 3.1.5 Вероятность ложного срабатывания ступени при бросках тока намагничивания .....                                | 69 |
| 3.1.6 Вероятность ложного срабатывания ступени в эксплуатационном режиме .....                                      | 71 |

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1.7 Вероятность излишнего срабатывания ступени .....                                                                                                  | 72  |
| 3.2 Особенности технической эффективности для резервирующей ступени<br>токовой защиты нулевой последовательности .....                                  | 79  |
| 3.3 Особенности технической эффективности для токовых релейных защит,<br>реагирующих на фазные величины .....                                           | 85  |
| 3.4 Режимно-коммутационный анализ технической эффективности токовой<br>ступенчатой релейной защиты линии в сетевом районе высоковольтных<br>линий ..... | 86  |
| 3.5 Методика выбора уставок токовых ступенчатых защит .....                                                                                             | 92  |
| 3.5.1 Варианты настройки основных ступеней .....                                                                                                        | 92  |
| 3.5.2 Настройка резервирующей ступени .....                                                                                                             | 93  |
| 3.6 Выводы по главе .....                                                                                                                               | 95  |
| ГЛАВА 4. КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА РАСЧЕТА ТЕХНИЧЕСКОЙ<br>ЭФФЕКТИВНОСТИ СТУПЕНЧАТЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ .....                                                    | 97  |
| 4.1 Обоснование реализации .....                                                                                                                        | 97  |
| 4.2 Требования к программе и ее возможности .....                                                                                                       | 102 |
| 4.3 Среда программирования .....                                                                                                                        | 103 |
| 4.4 Программная структура .....                                                                                                                         | 106 |
| 4.5 Дизайн программных форм .....                                                                                                                       | 109 |
| 4.5.1 Главная форма программы .....                                                                                                                     | 109 |
| 4.5.2 Форма расчетов технической эффективности и протоколирования<br>результатов .....                                                                  | 115 |
| 4.5.3 Форма задания параметров расчета .....                                                                                                            | 124 |
| 4.6 Выводы по главе .....                                                                                                                               | 127 |
| ГЛАВА 5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И<br>УСТАВОК ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ .....                                        | 128 |
| 5.1 Подготовка исходных данных .....                                                                                                                    | 128 |
| 5.2 Расчеты и анализ технической эффективности основных ступеней .....                                                                                  | 135 |
| 5.3 Расчеты и анализ технической эффективности резервирующей ступени<br>.....                                                                           | 152 |
| 5.4 Выводы по главе .....                                                                                                                               | 157 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                                        | 159 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....                                                                                                                                 | 163 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А_СХЕМЫ АНАЛИЗИРУЕМОГО РАЙОНА .....                                                                                                          | 174 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б_АКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ .....                                                                                                | 177 |

## ВВЕДЕНИЕ

Метрические релейные защиты (РЗ), повсеместно применяемые в электроэнергетике в настоящее время, являются быстродействующими системами контроля коротких замыканий (КЗ) в оборудовании и электрических сетях энергосистем и подавления данных повреждений путем отключения места КЗ с помощью силовых высоковольтных коммутаторов (выключателей), секционирующих сеть.

В связи с метрическим характером функционирования РЗ научно-технические задачи в этой области определяются главным образом метрологией средств РЗ, т.е. релейными измерительными органами. Этим вопросам в основном посвящаются новые разработки устройств и систем РЗ. Совершенствование в этом направлении весьма преуспело при разработке РЗ на всех элементных базах: электромеханической, микроэлектронной и микропроцессорной. Так, в современных цифровых дифференциальных РЗ оборудования и дистанционных РЗ линий благодаря найденным метрологическим решениям (торможение, конфигурация характеристик срабатывания в комплексной плоскости) удалось практически полностью (дифференциальные защиты) или частично (дистанционные РЗ) обеспечить ликвидацию потерь функционирования в виде отказов срабатывания, излишних и ложных действий, т.е. обеспечить существенную независимость выполняемых функций релейной защитой от режимно-коммутационных условий и видов повреждений в электрической сети. Для РЗ с обменом информацией о срабатывании между комплектами РЗ на концах линий, по принципу действия являющихся распространением дифференциального принципа на распределенные в пространстве линии путем реализации обмена информацией между пространственно-удаленными датчиками тока и комплектами аппаратуры РЗ на концах линий, как и в дифференциальных защитах оборудования не только в цифровой реализации, но и любой другой также удалось достигнуть подобных показателей.

Данные пути достижения режимно-коммутационной независимости функционирования РЗ несомненно должны применяться и в дальнейшем, однако остается количественно не меньший класс ступенчатых токовых и дистанционных РЗ (в первую очередь линий), в которых по принципу действия имеют место неустранимые потери функционирования РЗ: отказы срабатывания, излишние и ложные действия, зависящие от режимно-коммутационного состояния сети, видов КЗ, помех, что обобщенно выражается как зависимость от выбранных уставок. Хотя в современных ступенчатых РЗ ответственных объектов предусмотрен канал обмена о срабатывании комплектов РЗ на концах линии и тем самым решена проблема о быстродействующем срабатывании при КЗ на всем пространстве защищаемых линий, остаются вопросы выбора уставок и расчетов потерь вторых (третьих) и резервирующих ступеней, которые целесообразны к осмыслению и решению. Кроме того, подавляющая часть ступенчатых РЗ линий разных категорий ответственности выполняют функции основных и резервирующих защит без каналов обмена между комплектами РЗ на концах линий. Оборудование РЗ каналами обмена данных линий экономически невыгодно, но поиск и внедрение решений, снижающих потери и повышающих эффективность функционирования целесообразны и необходимы. Актуальность данного вопроса в настоящее время возрастает в связи с тем, что разработан большой арсенал электромеханических, микроэлектронных и особенно микропроцессорных РЗ, приблизительно одинаковых по своим потребительским качествам, однако нет однозначно объективного расчетного критерия качества для практического применения при выборе РЗ для каждого защищаемого объекта как элемента сети.

В связи с изложенным актуальной является задача изучения, разработки математического описания для расчета потерь (неправильных действий) и технической эффективности функционирования ступенчатых РЗ в зависимости от уставок, концентрирующих в своих значениях зависимость от режимно-

коммутационного состояния сети, также алгоритмов и программ определения оптимальных значений уставок, разработки практических способов реализации наилучшей настройки РЗ или близких к ней.

Анализ потерь РЗ показал, что потери следует подразделить на составляющие:

1) непосредственно связанные с уставками, зависящими от режимно-коммутационного состояния сети и видов КЗ, в дальнейшем называемых функционально-метрологическими (или функциональными, если не рассматривать погрешности измерения), т.е. обусловленных как метрологическим функционированием аппаратуры, так и функционированием сети (без учета аппаратурных отказов и других радикальных воздействий: ошибок персонала, стихийных явлений);

2) опосредованно связанные с уставками (аппаратурные отказы компонентов схем и конструкций каналов РЗ, ошибки персонала при настройке или профилактике, стихийные явления, приводящие к физическому изменению параметров канала и, как следствие, уставки);

3) не связанные с уставками, т.е. повреждения аппаратуры, действия персонала и стихийные явления, приводящие к изменению не каналов функционирования, а только инфраструктуры РЗ (изоляция, корпуса, аппаратуры).

В данной работе представлены разработки и исследования названных вопросов для ступенчатых токовых релейных защит высоковольтных электрических сетей от междуфазных и однофазных КЗ с учетом потерь непосредственно связанных с уставками, т.е. функционально-метрологических потерь, которые можно изменить или уменьшить силами квалифицированного эксплуатационного, в том числе оперативного персонала энергосистем. Непосредственное устранение потерь, обусловленных аппаратурными отказами, ошибками персонала, стихийными явлениями либо невозможно, либо непродуктивно техническими средствами эксплуатационного персонала

электроустановок. Изучение данных потерь также непродуктивно, т.к. выводы заранее известны: элементы устройств релейной защиты должны быть максимально надежны, персонал должен быть квалифицированный, от стихийных действий невозможно спастись.

### **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 РЗ высоковольтных линий, учитывающего функционально-метрологические потери РЗ, применение данного критерия для оценки качества работы разных каналов РЗ и наилучшей их настройки.

Для достижения поставленных целей 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 исследований**

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 результатов** исследований подтверждается строгостью теоретического обоснования, корректным использованием вероятностно-

статистических методов, результатами теоретических и практических исследований.

### **Новизна результатов**

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 «Тинчуринские 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).

В завершение данного раздела, своим приятным долгом автор считает выразить благодарность научному руководителю А.В. Шмойлову и коллегам кафедры электроэнергетических систем, научно-исследовательской лаборатории моделирования электроэнергетических систем и других кафедр Энергетического института ТПУ, поддержка, советы и замечания которых сыграли не последнюю роль в подготовке настоящей работы: А.С. Гусеву, Ю.В. Хрущеву, Р.А. Вайнштейну, Ю.Н. Исаеву, А.О. Сулайманову и др.

# **ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ТОКОВЫХ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

## **1.1 Релейная защита, как метрическая система контроля аварийной опасности**

Устройства и системы контроля и управления, в том числе релейная защита и автоматика (РЗА) электроэнергетических систем (ЭЭС), в большинстве своем построены по метрологическому принципу, т.е. в структуру этих средств, как правило, входит измерительный орган с непрерывной или релейной проходной характеристикой. В случае РЗА широко используются релейные измерительные органы с входными электрическими сигналами, которые могут быть как простые или базовые (ток и напряжение), так и производные (сопротивление, мощность), функционально связывающие базовые сигналы; также преобразованные величины: симметричные составляющие трехфазной системы и их производные, пропорциональные частоте, углу между базовыми или симметричными составляющими и др. При применении релейных измерительных органов встает 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.

Для большого числа средств контроля параметром реагирования являются значения некоторой распределенной в пространстве контролируемого объекта физической величины в заданном месте (точке) этого пространства. Такие параметры реагирования целесообразно назвать полевыми. Устройства и системы, реагирующие на полевые параметры реагирования, также целесообразно назвать полевыми. К ним относятся всевозможные сигнализации, защиты и автоматики в электрической части энергосистем: 1) сигнализация замыканий на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью, измерительные органы которой реагируют на

распределенное практически равномерно по пространству сети напряжение нулевой последовательности и контролируемое поэтому в любой удобной точке сети; 2) автоматики повышения и понижения рабочего напряжения сети, измерительные органы которых реагируют на распределенные по узлам и линиям сети напряжения и фиксируют последние в заданных интересующих узлах; 3) автоматики частотной разгрузки путем отключения неответственной нагрузки при понижении одинаковой по всей энергосистеме статической частоты, а потому измеряемой в любой точке сети, или частотной компенсации путем снижения загрузки или отключения агрегатов соответственно при повышении указанной статической частоты и измеряемой аналогично в любой точке сети; 4) пожарная сигнализация, датчики которой реагируют на распределенную по пространству контролируемого оборудования или помещений температуру, излучение, продукты термической деструкции, задымленность и другие параметры реагирования в выбранных местах этого оборудования или помещений.

Кроме полевых средств контроля, в силу сетевой структуры контролируемых объектов РЗА, широко используются так называемые потоковые устройства и системы контроля, реагирующие не на значения полевого параметра в определенной точке пространства автоматизируемого объекта, а на потоки (токи или мощности) в ветвях электрической сети, также в расчетном смысле замеры сопротивлений линий. Такие устройства и системы можно назвать потоковыми. К ним относятся все токовые РЗ, реагирующие на полные или симметричные составляющие токов, также на известные функции мощности и сопротивления, в состав аргументов которых входят токи и определяют потоковую структуру данных параметров реагирования.

Наиболее простой реализаций потоковой РЗ является максимальная токовая защита (МТЗ). Принцип действия МТЗ основан на использовании характерного признака возникновения КЗ – резкого увеличения тока через защищаемый элемент и секционирования сети коммутаторами

(выключателями), способными разорвать короткозамкнутые сети, благодаря чему имеется возможность отключить поврежденный участок. Настройка МТЗ заключается в удовлетворении двух требований селективности: отстройки от помех рабочего режима выставлением токовой уставки и обеспечении избирательности при КЗ выставлением временной уставки [1]. Первое требование достигается отстройкой от максимальной величины помехи в режиме без КЗ; второе требование – обеспечение избирательности при КЗ – достигается встречно-ступенчатым принципом выбора выдержки времени, согласно которому последующая по направлению к источнику питания защита имеет выдержку времени большую максимальной выдержки времени МТЗ предыдущих элементов [1]. Такая настройка приводит к тому, что короткие замыкания на элементах, наиболее удаленных от источников питания и поэтому характеризующихся наименьшими аварийными токами, отключаются с малой выдержкой времени, а КЗ возле источников питания, сопровождаемые большими аварийными токами, отключаются с большой выдержкой времени. Данное свойство МТЗ, отрицательно сказывающееся на эффективности функционирования защиты, обусловило необходимость разработки потоковой защиты с другим принципом настройки – ступенчатой токовой защиты (СТЗ), которая обеспечивает избирательность при КЗ с существенно повышенным, по сравнению с МТЗ, быстродействием (реализация данного принципа подробнее рассматривается далее).

Как показано на примере МТЗ и СТЗ, настройка потоковой защиты включает в себя обеспечение двух требований, которые, по сути, представляют собой требования селективности. В связи с этим, целесообразно различать два свойства селективности [2], которыми должны обладать устройства и системы контроля и управления, в том числе средства РЗА:

1. Первое свойство селективности устройств и систем контроля, как отстройка от помех (селективность несрабатывания при внешних КЗ и селективность несрабатывания без КЗ).

Средства РЗА, как и другие устройства, системы контроля и сигнализации должны быть отстроены от помех и тем самым могут претендовать на получение свойства селективности аварийного состояния автоматизируемого объекта. Это свойство является первым свойством селективности. Оно зависит от величины помех и от используемого вида параметра реагирования. Очевидно, чем меньше величина помех, тем выше селективность и наоборот. Что касается вида параметра реагирования, то последний обеспечивает тем большую селективность аварийного состояния, чем больше связан с контролируемым аварийным состоянием защищаемого объекта. Данное свойство достигается отстройкой от помех как посредством параметра реагирования (загрубление параметра реагирования МТЗ и резервирующей ступени СТЗ путем отстройки от рабочих токов, пусковых токов двигателей и аналогично посредством загрубления параметра реагирования основных ступеней СТЗ с помощью отстройки от токов при КЗ в заданных точках сети, согласования со ступенями предыдущих линий при КЗ на последних и др.), так и посредством увеличения времени действия (замедление действия релейной защиты на время затухания пусковых токов двигателей, бросков тока намагничивания, согласования по времени относительно времени ступеней предыдущих линий, с которыми произведено согласование по параметру реагирования, увеличение времени относительно защит предыдущего оборудования, от КЗ за которыми выполнена отстройка и др.).

2. Второе свойство селективности как выявление места повреждения (селективность срабатывания при внутренних КЗ).

Благодаря обязательному наличию коммутационных аппаратов, с помощью которых элементы (электрооборудование, двухконцевые и многоконцевые линии, секции и сборные шины) присоединяются к сети своими выводами или концами, имеется возможность выделить и отключить любой силовой элемент от сети. Поскольку в качестве современных коммутационных

аппаратов в подавляющем большинстве используются выключатели, способные отключать мощности или токи КЗ, возникает возможность ликвидации КЗ путем отключения от сети поврежденного элемента. Эта возможность может быть реализована автоматически, если аппаратура различает КЗ на элементе и вне его. Данное свойство избирательности оказывается достижимым, как показывает анализ, только у потоковых средств контроля. Такая потоковая аппаратура в виде РЗ в настоящее время повсеместно применяется, и это достигнуто в большинстве современных средств РЗ благодаря свойству селективно (правильно) отключать поврежденный элемент. Данное свойство селективности отличается от выше определенного первого свойства селективности аварийного состояния. Это другое свойство селективности, состоящее в способности выявлять поврежденный элемент, реализуется с помощью разных мероприятий контроля потоков в поврежденных и неповрежденных элементах, является вторым свойством селективности поврежденных или ответственных за аварийное состояние компонентов. К таким мероприятиям относится реализация принципов блокирования РЗ неповрежденных элементов при КЗ. Одним из таких принципов является принцип встречно-ступенчатой системы выдержки времени действия максимальной токовой защиты, уже отмеченный ранее. Другими способами блокирования токовых защит являются структура дифференциального принципа, обеспечивающего однозначное и контрастное различие внешнего и внутреннего КЗ в дифференциальной цепи и РЗ пространственно протяженных линий с обменом информацией о действии комплектов на концах (системы с блокирующими и разрешающими сигналами, дифференциально-фазный высокочастотный принцип). Принцип РЗ с обменом информацией между комплектами на концах линий (выводах оборудования) является ничем иным как распространением дифференциального принципа на пространственно протяженные защищаемые объекты.

### **1.1.1 Дифференциальный принцип релейной защиты**

По мере усложнения электрических сетей становилась все более актуальной проблема обеспечения их защитами, обладающими свойством селективности на всем пространстве защищаемого объекта и при этом обладающими одинаково высоким быстродействием при любых видах КЗ. В связи с этим с самого начала развития релейной защиты возникли и реализованы предложения по построению систем РЗ с сопоставлением сигналов измерительных преобразователей или датчиков тока, размещенных на границах пространства защищаемого объекта (дифференциальные РЗ, которые можно назвать распределенными на пространстве защищаемого объекта дифференциальными релейными измерительными органами) или с логическим обменом информацией между комплектами измерительных органов на концах контролируемой линии или выводах защищаемого объекта (РЗ с высокочастотным или оптоволоконным обменным каналом). Отличительной особенностью данных систем РЗ является в идеальном случае полная независимость их функционирования от режимов и коммутаций в сети, т.е. данные РЗ абсолютно приспособлены к любому защищаемому объекту в любой сети. Они выполняют свои действия с наилучшими показателями качества работы РЗ: селективностью, чувствительностью, надежностью функционирования и достаточным быстродействием. Однако в связи с погрешностями датчиков электрических величин, например, трансформаторов тока, в дифференциальных защитах возникают помехи, от которых необходимо отстроиться, показатели качества функционирования РЗ снижаются и возникают потери: отказы срабатывания, излишние и ложные действия. В случае РЗ с обменом информацией между комплектами на концах защищаемого объекта наряду с погрешностями датчиков возникают помехи, вызванные электрическими величинами рабочих режимов, от которых необходимо отстроиться. Помехи дополняются также погрешностями, вызванными конечной скоростью распространения электромагнитных волн вдоль

пространства линии, сдвигами углов электрических величин на концах линии, обусловленными ее поперечной проводимостью. В переходных процессах датчики могут существенно искажать первичные электрические величины, обуславливая помехи.

Указанные недостатки в описанных дифференциальных и с обменом информацией между комплектами РЗ в связи с уникальностью их положительных свойств стремятся устранить. Для этого используют такой универсальный прием как торможение (автоматическое загробление) уставки [1, 3], реализуемое разными алгоритмами демпфирования помех, и зависящее от наиболее радикальной помехи (небаланс, пропорциональный в своей систематической части сквозному току при внешних КЗ и асинхронных режимах в дифференциальных защитах, симметричный асинхронный ток в фильтровых защитах линий). В результате возникает эффект существенного автоматического подавления большой систематической помехи при незначительном уменьшении чувствительности к дифференциальному току или практически неизменной чувствительности к току КЗ по сравнению с радикальным автоматическим снижением чувствительности к асинхронному току. Существует также другой и в некоторой степени противоположный мероприятию торможения принцип выравнивания чувствительности комплектов на концах линий, например, путем компенсации падений напряжений обратной и нулевой последовательности при КЗ на длинных линиях. Помехи во вторичных цепях датчиков, вызванные свободными составляющими переходных процессов, устраняют с помощью соответствующих входных частотных фильтров. Таким образом, в широко используемых дифференциальных и с обменом информацией между комплектами РЗ предусмотрены все технические меры для достаточно качественного контроля КЗ на защищаемых объектах. В связи с этим данные устройства и системы рассматривают как РЗ с абсолютной селективностью, подчеркивая их существенное преимущество в высшем свойстве селективности

РЗ [1] по сравнению с другими РЗ. Однако реально названные РЗ не могут претендовать на такое высокое качество, т.к. принципиально в них остаются причины неселективного действия из-за невозможности устранить помехи в полном объеме. Поэтому их целесообразно назвать РЗ с жестким выделением области действия.

### **1.1.2 Ступенчатый принцип релейной защиты**

Наряду с РЗ с абсолютной селективностью не менее широко распространены в электрических сетях ступенчатые РЗ, которые называют РЗ с относительной селективностью и которые в отличие от первых не имеют жестко выделенной области действия по параметру реагирования.

Селективность в них достигается способом настройки отдельных ступеней по принципу токовой отсечки, при этом каждая ступень имеет свою область действия и время срабатывания, которые согласуются с однонаправленными ступенями соседствующих элементов. Ступенчатые РЗ соседствующих элементов (линий) в направлении действия РЗ соотносятся (именуются) как РЗ предыдущих элементов и РЗ последующего (защищаемого) элемента в противоположном направлении действия РЗ. Элементы в противоположном направлении действия РЗ на каждом конце защищаемой линии или элементы за «спиной» РЗ каждого конца защищаемой линии называются смежными. Смежными также называются линии сети ступенчатых РЗ, установленных на выводах трансформаторов и автотрансформаторов и действующих не в направлении защиты указанного оборудования, а в противоположном направлении резервирования РЗ линий сети.

Настройка данных РЗ осуществляется в следующей последовательности: сначала настраиваются по параметру реагирования и времени первые ступени РЗ линий и дифференциальные защиты трансформаторных элементов, затем вторые ступени линий и первые ступени трансформаторов и автотрансформаторов аналогично для всей сети и т.д. В данной последовательности проверяется также возможность настройки резервирующих

ступеней. Благодаря такой процедуре рационально подготавливаются по параметру реагирования и времени уставки предыдущих и смежных линий. Названные уставки необходимы для согласования с ними по чувствительности и времени однонаправленных ступеней защищаемых линий и трансформаторных компонентов с большим временем действия и, чаще всего, с не меньшим, а, как правило, большим номером ступени по сравнению со ступенями защит предыдущих и смежных линий. Согласование заключается в том, что ступени РЗ последующих компонентов с большими выдержками времени должны быть менее чувствительными к КЗ по сравнению со ступенями РЗ предыдущих элементов с меньшими выдержками времени. Благодаря этому и секционированию сети выключателями осуществляется второе свойство селективности ступенчатых защит. По сравнению с МТЗ у основных каналов ступенчатых РЗ оно выполнено более совершенно благодаря совместному согласованию токового параметра реагирования и времени действия канала РЗ с каналами РЗ предыдущих элементов сети.

Так, основная настройка СТЗ нулевой последовательности по экспертно-руководящему методу настройки (ЭРМ) заключается в следующем. Первые самые грубые ступени отстраиваются от КЗ на дальней границе пространства защищаемого объекта с коэффициентом запаса. Благодаря этому эта ступень фиксирует КЗ только на части защищаемого объекта и выдержка времени у этой ступени может быть принята самой малой (обычно это естественное время действия измерительного органа и логической части). Чтобы обеспечить фиксацию КЗ на незащищенной первой ступенью части объекта по параметру реагирования, используют вторую ступень, которая согласовывается с быстродействующими защитами (в том числе с первыми ступенями) предыдущих (подключенных к противоположным подстанциям защищаемого объекта) элементов при КЗ на этих элементах. Вторая ступень более чувствительная по сравнению с первой ступенью защищаемого объекта, поэтому она фиксирует КЗ на защищенной части защищаемого объекта с

выдержкой времени, равной ступени селективности (0,5-0,7 с). При этом требуется гарантированная минимальная чувствительность при КЗ на дальнем конце защищаемого объекта. Вторая ступень является основной в ступенчатой защите, т.к. она в целом защищает объект. Первая ступень дополняет вторую ступень в части быстродействия, т.е. обеспечивает практически мгновенное отключение КЗ при больших токах и в этом смысле может рассматриваться как основная. По условиям чувствительности в ряде случаев предусматривают третью и др. ступени, которые являются более чувствительными и имеют большие выдержки времени по сравнению со второй ступенью.

Однако резервирующие ступени (четвертая ступень нулевой защиты) в рамках обсуждаемой процедуры согласования в большинстве случаев настроить не удастся из-за недостаточной чувствительности, обусловленной такой настройкой. В связи с этим для резервирующих ступеней приходится нарушать описанную весьма жесткую и однозначную логику согласований основных ступеней. Так, вместо согласования с чувствительными основными ступенями предыдущих и смежных линий проводят отстройку резервирующих ступеней от помех рабочих режимов по параметру реагирования, что для обеспечения селективности обуславливает необходимость отстройки по времени от резервирующих ступеней предыдущих элементов по встречно-ступенчатому принципу.

Однако реализация свойств селективности СТЗ из-за необходимости учитывать метрологические погрешности измерительных преобразователей (трансформаторов тока) и аппаратуры (измерительные органы), а также сложностью и невозможностью учета всех режимно-коммутационных состояний сети, или, другими словами, невозможностью обеспечить идеальные (на всем пространстве защищаемого объекта и с минимальной выдержкой времени) свойства чувствительности и селективности, приводит к наличию допущенных потерь у отдельных каналов РЗ [4]. К таким потерям относятся допущенные отказы первой ступени при КЗ на защищаемом объекте,

допущенные излишние действия основных и резервирующих ступеней в случае кольцевых и сложно-разветвленных сетей при наличии коротких предыдущих линий в первом случае и линий более дальних периферий во втором. В реализациях дифференциального принципа отсутствуют аналогичные допущенные потери, а от потерь, обусловленных случайными помехами небаланса, достаточно эффективно можно отстроиться с помощью рассмотренного мероприятия торможения.

Рассмотрим предмет потерь более подробно.

## **1.2 Потери функционирования релейной защиты**

Потерями функционирования релейной защиты являются отказы срабатывания при повреждении защищаемого объекта, ложные срабатывания при отсутствии повреждения и излишние срабатывания при повреждении внешних, незащищаемых рассматриваемой защитой объектов. Названные потери можно классифицировать по причине их возникновения:

- 1) Потери, связанные с несовершенством элементной базы (аппаратурные потери РЗ) и конструкторскими недостатками. Аппаратурные потери свойственны РЗ основанному на всех элементных базах, и связаны со старением или браком элементной базы. Аппаратурные потери
  - электромеханических РЗ: механический износ подвижных частей реле, старение и повреждение (истирание, высыхание) изоляции, коррозия механических элементов (ржавление винтов и клеммных зажимов);
  - микроэлектронных РЗ: повреждения резисторов и других соединительных элементов, транзисторов, диодов [5];
  - микропроцессорных РЗ: разрушение медных дорожек печатной платы, проходящих под конденсаторами из-за просочившегося электролита [5]; сбои в работе программного обеспечения (hardware

and software incompatibilities) [6]; выход из строя источников питания из-за изменения параметров конденсаторов во времени [5] и др.

В эту группу также можно отнести потери вызванные нарушением статической и динамической устойчивости функционирования РЗ [3]. Примером первого является неточность измерения (отклонение величин срабатывания выше допустимых), а второго – искажение подводимых к РЗ сигналов во время переходных процессов в связи с насыщением трансформаторов тока, к которым подключена РЗ.

- 2) Потери, связанные с нарушением устойчивости к влиянию внешней среды. Влияющие факторы (проверяемые параметры):
  - электрические, электромагнитные воздействия: нарушение электрической прочности изоляции в связи с высоким напряжением переменного или постоянного тока;
  - электромагнитная совместимость (помехоустойчивость): быстрые переходные процессы, устойчивость к электромагнитным полям и наведенным помехам, электростатический разряд;
  - механические нагрузки: вибрация, механические удары.
  - климатические условия, например, влажность.
- 3) Потери, связанные с ошибками эксплуатационного и монтажно-наладочного персонала.
- 4) Функциональные потери. К данной группе потерь будем относить потери, непосредственно обусловленные уставками РЗ и функционированием сети. В связи с тем, что данные потери выделяются в отдельную группу впервые, рассмотрим их детальнее.

Потери РЗ в функциональном плане возникают в связи с проявлением неполноты свойств селективности и чувствительности, определяемых настройкой РЗ и существованием множества режимно-коммутационных состояний сети. Как показывает опыт проектирования РЗ, обеспечить желаемую одновременность с предельно возможным эффектом выполнения

каждого свойства невозможно. Отсюда возникают соответствующие потери: при недостатке чувствительности – отказы срабатывания, при недостатке селективности – ложные и излишние действия. Данные потери наиболее явно проявляются в СТЗ в связи с наличием отмеченных выше допущенных потерь и самого принципа их настройки и проектирования [7], недостатки которого обусловлены использованием детерминированного подхода к определению уставок в условиях случайного характера большинства процессов в электроэнергетике и особенно явно проявляются в ряде сложных из-за своей неоднозначности случаях. На этот счет в ПУЭ [8] присутствует следующая рекомендация: «Расчетные значения величин должны устанавливаться, исходя из наиболее неблагоприятных видов повреждения, но для реально возможного режима работы электрической системы». Неразрешимость проблемы видна в самой формулировке рекомендации, которая не может дать никакой конкретики для выбора «реально-возможного режима». В то же время, обеспечение селективности функционирования токовых РЗ связано с отстройкой последней от максимально-возможных по току режимов, а для расчета чувствительности необходимо определить минимально-возможный по току режим.

Данные обстоятельства проектирования ступенчатых РЗ вынуждают в ряде случаев применять защиты с недостаточной селективностью или чувствительностью. В первом случае токовые защиты имеют излишние действия при внешних КЗ, во втором случае имеют место отказы при КЗ вдоль защищаемого элемента. Отмеченные факты подтверждаются приводимой далее статистикой.

Рассмотренные группы потерь можно дополнительно классифицировать по зонам ответственности лиц:

1 группа (аппаратурные потери РЗ) – зона ответственности заводо-изготовителей РЗ и непосредственных изготовителей элементов РЗ.

2 группа (потери из-за влияния внешней среды) – зона ответственности заводов-изготовителей РЗ и обслуживающих места установки РЗ лиц.

3 группа (потери из-за ошибок эксплуатационного и монтажно-наладочного персонала) – зона ответственности персонала, обслуживающего РЗ (недостаточная квалификация).

4 группа (потери из-за недостатка чувствительности и селективности) – зона ответственности проектного и эксплуатационного персонала.

Статистические соотношения потерь по разным данным [9, 10] следующие:

1 группа – 6,3 % - 40 %,

2 группа – 21 %,

3 группа – 6-9 % ,

4 группа – 8% - 40 % .

Статистика по видам потерь для 2006 г.: устройства РЗА объектов ЕНЭС срабатывали 47657 раз, из них правильные срабатывания составили 47268 случаев (98,7 %), неправильные – 389 случаев (124 излишних срабатывания, 176 ложных срабатываний и 89 отказов в срабатывании). Процент правильной работы РЗ– 98,4 %, электроавтоматики – 98,9 %, противоаварийной автоматики – 99,4 %. [9].

Проведенный анализ причин неправильных действий (потерь) релейной защиты позволяет ввести классификацию потерь РЗ по причинам их возникновения (таблица 1.1).

Как следует из проведенного анализа потерь, их причин и зон ответственности, статистических данных, с точки зрения проектировщика РЗ и эксплуатирующей организации, существенное значение имеет область функциональных потерь, обусловленных настройкой РЗ (на которую он может влиять и управлять): обеспечением ее чувствительности и селективности.

**Таблица 1.1 – 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:<br>1) отказов аппаратуры;<br>2) неправильных операций персонала;<br>3) непредвиденных (стихийных) воздействий и воздействий внешней среды (электромагнитные помехи, загрязнение, влага и др.). | Функционально-радикальные:<br>1) конструкторско-схемные;<br>2) ошибочные;<br>3) разрушительные. |
| Не связанные с уставками - повреждение инфраструктуры РЗ (корпуса, аппаратуры) вследствие различных причин (неправильных действий персонала, стихийных воздействий)                                                                                                                             | Периферийные                                                                                    |

### **1.3 Существующие способы оценки качества функционирования релейной защиты**

Качество функционирования релейной защиты определяется полнотой ее свойств. Базовые свойства РЗ определяются требованиями селективности, чувствительности, быстродействия и надежности. Для полного учета всех аспектов функционирования РЗ данные требования были уточнены и расширены в работах [11, 1]. В результате введены следующие свойства [12]:

Надежность – свойство выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях эксплуатации (обеспечивать надежность срабатывания и надежность несрабатывания при внешних КЗ и при их отсутствии) [13]. В соответствии с классификацией [1] надежность является свойством самого низкого уровня.

Техническое совершенство – свойство, объединяющее селективность, быстродействие и устойчивость функционирования. Под устойчивостью функционирования понимается чувствительность к внутренним коротким замыканиям, устойчивость быстроты срабатывания при внутренних КЗ, устойчивость несрабатывания при внешних КЗ (т.е. отстроенность от них),

устойчивость несрабатывания без КЗ. Техническое совершенство является свойством следующего второго уровня (после надежности) [1].

Эффективность функционирования следует понимать как отношение реального выходного эффекта системы к ее предельному выходному эффекту, установленному в предположении идеально полных технического совершенства и надежности [11]. Является свойством самого высокого уровня.

Рассмотрим способы определения качества функционирования РЗ с позиции данных свойств [14-53].

### **1.3.1 Исследование способов определения надежности, технического совершенства и эффективности релейной защиты**

Оценка качества работы РЗ всегда занимала важное место в иерархии электроэнергетических задач. Первое время в 1930-ые годы единственными показателями качества работы РЗ в отечественной электроэнергетике являлись показатели количества правильных и неправильных действий РЗ [14] и соответствующий процент правильной работы, равный отношению числа правильных  $n_{п.с.}$  действий к сумме правильных и неправильных  $n_{н.с.}$ :

$$\eta = \frac{n_{п.с.}}{n_{п.с.} + n_{н.с.}} \cdot 100, \quad (1.1)$$

С помощью данного показателя оценивалось качество функционирования РЗ вплоть до 1965 года. Но такая оценка не позволяла достоверно оценить техническое совершенство и эффективность функционирования РЗ [11].

Первыми работами в этой области были представлены в публикациях В.Л. Фабриканта [15], Ф.А. Кулиева [16] и статье Э.П. Смирнова «Подход к расчету надежности устройств релейной защиты» [17], вышедшие в одном номере журнала «Электричество». Общим элементом названных работ является установление того факта, что целесообразно использовать теорию надежности для оценки устройств РЗ, но с учетом особенностей функционирования РЗ.

Следует наиболее подробно остановиться на работах Смирнова [17, 18], которые привлекли внимание научной общественности, следствием которого стала дискуссия [19-22].

Тема статьи [17], как отмечает сам автор, предложена ему доктором технических наук, профессором А. М. Федосеевым. В своей работе Э.П. Смирнов отмечает особенности оценки надежности релейной защиты, которые требуют развитие методов общей теории надежности. Среди них выделяется необходимость предъявления к РЗ двух требований – надежности срабатывания и надежности несрабатывания. Ненадежность защиты проявляется в отказе срабатывания, излишнем действии и ложном срабатывании [17]. Смирнов Э.П. выделяет два общепринятых показателя из общей теории надежности:

1. Вероятность отсутствия отказов в срабатывании (или вероятность безотказной работы [24])  $P(t)$  в течение времени  $t$ . Как будет показано далее, по отношению к РЗ данный показатель характеризует совокупную надежность работы защищаемого элемента и устройства защиты.
2. Вероятность безотказного срабатывания (или другое название – готовность устройства к срабатыванию)  $R(n)$  при последовательности  $n$  таких коротких замыканий, при которых требуется срабатывание устройства (или  $n$  испытаний на срабатывание). Данный показатель в отличие от первого, является мерой надежности самой РЗ [17].

Однако использование указанных показателей при расчете аппаратной надежности конкретных схем защиты, как отмечает сам автор, приводит к практическим трудностям, связанным с громоздкостью соответствующих расчетных выражений.

В следующей своей работе [18] Смирнов Э.П. отмечает, что при анализе надежности релейной защиты целесообразно различать отказ устройства и отказ в срабатывании. Первое есть событие утраты устройством способности в отключении любых коротких замыканий, т.е. утрата устройством способности

осуществить требуемое срабатывание, что соответствует принятому в теории надежности представлению об отказе [23]. В свою очередь, отказ в срабатывании автор определяет как событие, состоящее в отсутствии на выходе защиты сигнала на отключение при таком КЗ, при котором требуется срабатывание данного устройства РЗ.

В откликах [19-21] на рассмотренные работы Э.П. Смирнова справедливо отмечается незаконченность предложенных решений и их дискуссионность. Кроме того, в работе [20] отмечается неправомерность использования оценки надежности защиты процентом правильных действий (1.1).

Неправомерность связана с тем, что данный критерий не учитывает количество установленных в энергетической системе защит анализируемого типа, зависит от частоты повреждаемости оборудования, а также наличия других защит установленных вместе с анализируемой. Например, в случае оценки надежности дистанционной защиты, если вместе с ней на линии установлена быстродействующая высокочастотная защита, последняя отключает короткие замыкания настолько быстро, что дистанционная защита не успевает сработать. В этом случае, процент правильной работы дистанционной защиты равен нулю, а неправильной, хотя бы при одном случае ложного действия, - 100 % [20]. В то же время, очевидно, что при оценке надежности автономно работающей дистанционной защиты, при ее неизменном качестве, результаты будут другими. Нецелесообразность использования данного показателя для оценки эффективности функционирования РЗ, как будет показано далее, также отмечается в [11].

По мнению авторов [24, 25], более объективными для сравнения различных типов устройств являются следующие интервальные оценки надежности устройств РЗ и противоаварийной автоматики: параметры потока неправильных срабатываний, отказов в срабатывании, ложных срабатываний, потока излишних срабатываний, вероятность безотказной работы и др., которые задают интервал возможных значений случайной величины с

заданным коэффициентом доверия. Данные показатели позволили авторам на основе обработки статистических материалов для ряда электромеханических РЗА, сделать соответствующие сравнения [24, 47]. Например, было установлено, что интенсивность (математическое ожидание числа отказов в срабатывании на одно устройство РЗА в единицу времени) ложных срабатываний фильтровой высокочастотной направленной защиты типа ПЗ-164 ниже, чем дифференциально-фазной высокочастотной защиты типа ДФЗ-2 с вероятностью не менее 0,95 [24].

С целесообразностью предлагаемых показателей в отклике [26] на [24] согласился Барзам А.Б, в котором часть из них была подробно рассмотрена. Так, Барзама А.Б. предлагает оценивать вероятностью безотказной работы  $P(t)$  за определенный интервал времени  $t$  степень надежности РЗ. Данный показатель характеризует уровень качества рассматриваемого устройства в отношении надежности и указывает вероятность того, что полностью исправное устройство за период эксплуатации  $t$  под влиянием потока случайных событий не откажет в выполнении функционального назначения. Например, при вероятности безотказной работы за период времени  $t$   $p(t)=0,9$  можно ожидать, что в случае возникновения к концу периода  $t$  КЗ, из 100 устройств, которые должны подействовать, правильно сработают 90 устройств, 10 устройств откажут; или иначе, если за период от 0 до  $t$  произойдет девять КЗ, при которых устройство сработало правильно, на десятом случае КЗ вероятно неправильное действие (отказ) устройства [26].

Однако впоследствии, например в [27], уточняется использование критерия вероятности безотказной работы. Обосновывается, что в качестве критерия надежности функционирования релейной защиты вероятность  $p(t)$  непригодна. Приводится контрпример для [26]: «если короткие замыкания редки и устройство защиты вообще срабатывает крайне редко, но при этом чаще всего излишне, то несмотря на очень высокую вероятность  $P(t)$  потери из-за ненадежности могут превысить полезный эффект». Но при этом в [27] не

отрицается возможность использования  $P(t)$  как показателя аппаратной безотказности изделия, для которого будущие условия функционирования еще не конкретизированы.

Отмеченные сложности и дискуссионный характер предлагаемых показателей, во многом были разрешены в работах Зейлидзона Е.Д., Смирнова Э.П. и Федосеева А.М. [11, 27, 1]. Предложенные в них решения стали своего рода компромиссом и явились точкой отчета для современного подхода к оценке свойств РЗ через надежность, техническое совершенство и эффективность РЗ. В [27] Смирновым Э.П. были предложены следующие математические представления данных критериев через потери выходного эффекта из-за неполноты оцениваемых свойств:

- Эффективность функционирования

$$E = \Phi / \Phi_{\Pi}, \quad (1.2)$$

где  $\Phi$  – реальный выходной эффект системы за расчетное время;  $\Phi_{\Pi}$  – ее предельный выходной эффект, определяемый в предположении идеально полного технического совершенства и надежности за то же время.

- Техническое совершенство

$$E_0 = \frac{\Phi_0}{\Phi_{\Pi}} = \frac{\Phi_{\Pi} - \Delta\Phi_{\Gamma}}{\Phi_{\Pi}}, \quad (1.3)$$

где  $\Phi_0$  – выходной эффект идеально надежной системы;  $\Delta\Phi_{\Gamma}$  – потери выходного эффекта из-за технического несовершенства.

- Надежность

$$R = \frac{\Phi_{\Pi} - \Delta\Phi_{\Pi}}{\Phi_{\Pi}}, \quad (1.4)$$

где  $\Delta\Phi_{\Pi}$  – потери выходного эффекта из-за ненадежности.

Как следует из приведенных в начале раздела определений и выражений (1.2-1.4), полнота свойства данного уровня определяется в предположении идеальности свойства более низкого уровня. Например, полноту выполнения технического совершенства можно рассматривать только в предположении

идеальной надежности аппаратуры (сто процентное выполнение требований срабатывания и несрабатывания при возникновении соответствующих условий).

Относительно РЗ выражения (1.2)÷(1.4) были раскрыты в работах [11, 27]. Однако, в связи с практической сложностью расчета, описанная в них методика расчета не получила широкого распространения.

Частичное отражение эффективности функционирования РЗ в соответствии с выражением (1.2) дает процент правильных действий РЗ (1.1), представляемый согласно (1.5).

$$\eta = \frac{n_{п.с.}}{n_{п.с.} + n_{о.с.} + n_{и.с.} + n_{л.с.}} \cdot 100, \quad (1.5)$$

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

Процент правильных действий РЗ и дополняющий его до ста процентов показатель неправильных действий, применяются в настоящее время как в странах СНГ, так и за рубежом [5, 9, 11, 48, 49, 50]. Как указано, например, в [49], данный показатель используется как для оценки эффективности, так и надежности. Однако его использование для оценки эффективности может исказить картину, что было отмечено в [11] и с чем трудно не согласиться, принимая во внимание следующее пояснение.

При измерении с помощью процента правильных действий эффективности функционирования РЗ, полученная оценка может отличаться от (1.2). Причина в том, что число неэффективных срабатываний ( $n_{и.с.} + n_{л.с.}$ ) стоит в знаменателе (1.5), но эти срабатывания приводят к потерям, которые для получения выходного эффекта защиты следует вычитать из эффекта от требуемых срабатываний, пропорционального  $n_{п.с.}$ . Поэтому естественное место члена ( $n_{и.с.} + n_{л.с.}$ ) – в числителе со знаком «минус». К тому же, неэффективные срабатывания могут привести к отрицательному выходному эффекту, а это означает отрицательную эффективность функционирования. Из (1.5) видно, что

показатель  $\eta$  не отражает данную особенность защиты. Кроме того, «можно также показать, что «при определенном числе внутренних коротких замыканий ( $n_{п.с.} + n_{о.с.}$ ) и одном и том же числе отказов функционирования ( $n_{о.с.} + n_{и.с.} + n_{л.с.}$ ) показатель  $\eta$  тем больше, чем большую долю от общего числа отказов функционирования составляют излишние и ложные срабатывания» [11].

Отсюда следует, что оценка эффективности РЗ процентом правильных действий может не соответствовать действительности. Между тем, на основе рассуждений выше, выражений (1.2) и (1.5) большей определенностью по отношению к эффективности функционирования РЗ по сравнению с процентом правильных действий будет отличаться следующая величина [11]:

$$\nu = \frac{n_{п.с.} - (n_{и.с.} + n_{л.с.})}{n_{п.с.} + n_{о.с.}}. \quad (1.6)$$

Приведенное выражение (1.6) – относительно выраженный реальный эффект защиты при неучете различий в последствиях отказов функционирования разного рода. Действительно, в (1.6) числитель пропорционален реальному выходному эффекту, если не различать последствия отказов функционирования. Знаменатель (1.6) представляет собой число внутренних КЗ, пропорциональное предельному выходному эффекту защиты.

Для оценки именно эффективности функционирования РЗ также весьма полезными являются показатели периодичности различных действий или отказов РЗ, представляющие собой среднюю продолжительность между повторными действиями одного устройства, определяемую количеством устройств, деленным на число их действий в год [24, 11, 30, 50]. Например, под периодичностью отказов в срабатывании понимается среднее значение времени работы устройства РЗ между отказами в срабатывании. Однако данные показатели на сегодняшний день широко не используются.

В ряде западных стран и США надежность систем релейной защиты оценивается тремя показателями [48, 50-52]:

### 1. Надежность срабатывания (Dependability) $D$

$$D = \frac{N_c}{N_c + N_f}, \quad (1.7)$$

где  $N_c$  – количество правильных срабатываний защиты,  $N_f$  – количество отказов в срабатывании.

### 2. Надежность несрабатывания (Security) $S$

$$S = \frac{N_c}{N_c + N_u}, \quad (1.8)$$

где  $N_u$  – количество излишних и ложных срабатываний.

### 3. Общая надежность (Reliability) $R$

$$R = \frac{N_c}{N_c + N_f + N_u}. \quad (1.9)$$

Как отмечено в [48], отсутствие в данных показателях отдельно выделенной категории ложных срабатываний РЗА (как это принято в России), не позволяет объективно оценивать надежность и эффективность работы РЗА. Тем не менее, по мнению авторов [48], при соответствующей модификации (разделении  $N_u$  на ложные и излишние действия) оценка результатов эксплуатации РЗА данными показателями будет более информативной и даст большие возможности для сопоставления надежности различных вариантов исполнения систем РЗА.

В настоящее время в связи с внедрением микропроцессорных устройств РЗА для оценки эффективности соответствующих мероприятий становится необходимым комплексный учет различных систем РЗА и их особенностей [3, 48, 50, 53, 54]. Для этих целей в [48, 50] предлагается использовать интегральный показатель эффективности, учитывающий все элементы в составе рассматриваемого канала РЗА (измерительные трансформаторы тока и напряжения, кабели, собственно устройства РЗА, цепи оперативного тока, выходные цепи защиты и т.д.) (1.10).

$$M[\mathcal{E}] = \frac{k_1}{T_{o,cp}} + \sum_{i=1}^n k_{ct,i} q_{P3,i} \omega_{BK3} + \sum_{j=1}^m k_{ct,j} q_{P3,j} \omega_{K3}, \quad (1.10)$$

где  $M[\mathcal{E}]$  – математическое ожидание снижения эффективности из-за неидеальных характеристик устройств РЗА;  $k_1$ ,  $k_{ct,i}$ ,  $k_{ct,j}$  – стоимостные коэффициенты, учитывающие стоимость последствий рассматриваемого отказа в функционировании (в денежном или другом выражении);  $q_{P3,i}$ ,  $q_{P3,j}$  – коэффициенты неготовности (или усредненные на расчетном интервале времени значения функций неготовности) системы РЗА, учитывающие как отказы в функционировании из-за неидеального технического уровня, так и отказы из-за неидеальной надежности;  $\omega_{BK3}$ ,  $\omega_{K3}$  – параметры потоков повреждений соответственно вне зоны защиты и на защищаемом объекте;  $T_{o,cp}$  – средняя наработка на отказ в режиме дежурства.

По мнению авторов, приведенный показатель (1.10), позволяет достоверно оценить эффективность инвестиций в мероприятия, направленные на совершенствование систем РЗА ЭЭС, в том числе на внедрение микропроцессорных РЗА. Вместе с тем данный показатель существенно определяется стоимостными параметрами, надежность, техническое совершенство и эффективность посредством его могут быть определены только опосредовано с экономической точки зрения.

В работе [54] для оценки надежности микропроцессорных РЗ предлагается использовать нормализованный показатель отказов (1.11), учитывающий следующие три типа отказов:

- 1) отказы реле, не связанные с неправильными действиями РЗ, но требующие ремонта или замены вышедших из строя элементов, блоков и модулей или программного обеспечения ( $M_S$ );
- 2) неправильные действия релейной защиты, т.е. излишние и ложные действия, а также отказы при КЗ внутри области действия ( $M_D$ );

- 3) ошибки персонала, связанные с эксплуатацией, тестированием и программированием реле, влияющие на правильность действия этого реле, но выявленные до наступления неправильного действия РЗ ( $M_P$ ).

$$M_{\Sigma} = \left( \frac{M_S + M_D + M_P}{N} \right) \cdot 100, \quad (1.11)$$

где  $N$  – количество реле рассматриваемого типа, находящихся в эксплуатации за принятый период времени.

Общим свойством (1.10) и (1.11) является их интегральный подход. Посредством данных показателей теоретически можно учесть обстоятельства производства, функционирования и эксплуатации РЗ. Однако на практике использование данных показателей затрудняется сложностью расчета их составляющих.

Ввиду того, что функционирование РЗ осуществляется в электроэнергетической системе, являющейся по своей сущности недетерминированной, существуют подходы, учитывающие вероятностные условия функционирования РЗ при оценке ее характеристик и для оптимизации уставок.

### **1.3.2 Вероятностный подход для оценки характеристик и настройки релейной защиты**

Вероятностный характер токов, напряжений и, соответственно, их производных и комбинаций (симметричных составляющих, потоков мощности, сопротивления), контролируемых релейной защитой, обуславливает появление различных вероятностно-статистических подходов к оценке свойств РЗ, а также оптимизации ее уставок [38-42, 45, 55].

Вероятностно-статистические методы позволяют учесть особенности работы релейной защиты, определяемые топологией сети, местоположением в ней защищаемой линии, видами потребителей электроэнергии, видами коротких замыканий и местом КЗ.

Наиболее полно вероятностно-статистический подход представлен в работах Якоба Д. [39] и Шалина А.И. [45]. Остановимся на них подробнее.

Как отмечает Якоб Д., каждая из сторон технического совершенства конкретного устройства РЗ с заданным объемом функций и быстродействием определяется двумя основными факторами: 1) вероятностными свойствами воздействующей величины параметра реагирования, являющимися для рассматриваемой защиты заданными; 2) характеристикой срабатывания защиты  $\varphi(V_{\Pi})$ , являющейся математическим выражением алгоритма функционирования устройства РЗ и подлежащим определению при расчете защиты ( $V_{\Pi}$  – параметр срабатывания РЗ).

В качестве количественной оценки технического совершенства РЗ предлагается использовать параметр потока отказов в срабатывании и параметр потока излишних срабатываний. Расчет указанных вероятностных показателей иллюстрируется рисунком 1.1.

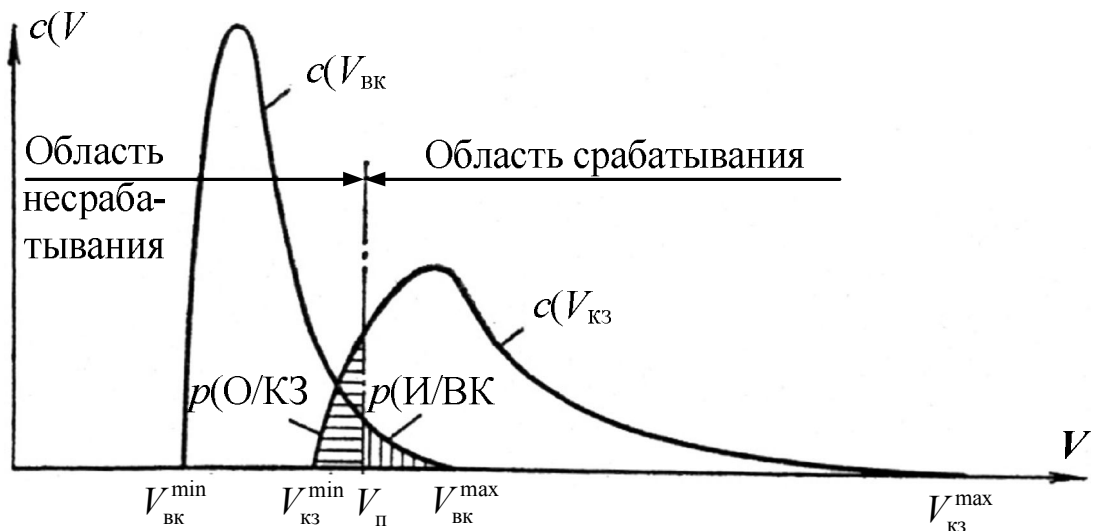


Рисунок 1.1 – К определению вероятностных показателей технического совершенства РЗ

Рисунок 1.1 приведен для РЗ, реагирующей на одну электрическую величину  $V$ , например, для РЗ максимального типа с параметром срабатывания  $V_{\Pi}$  и исходными вероятностными характеристиками: параметрами потока  $\omega$

внутренних (индекс «кз») и внешних (индекс «вк») повреждений и соответствующими плотностями распределения вероятностей  $c(V_{кз})$  и  $c(V_{вк})$ .

На рисунке заштрихованы две области – области отказов и излишних действий рассматриваемого устройства РЗ, определяемых соответствующими условными вероятностями отказа  $p(O/KЗ)$  и излишних действий  $p(I/BK)$ . Данные области имеют место в связи с наложением вероятностных характеристик внутренних и внешних повреждений. В этом случае параметры потока отказов в срабатывании  $\omega_o$  и излишних действий  $\omega_{и}$  равны (1.13) и (1.14).

$$\omega_o = \omega_{кз} p\{V_{кз} < V_{п}\} = \omega_{кз} p(O/KЗ) = \omega_{кз} \int_{V_{кз}^{\min}}^{V_{п}} c(V_{кз}) dV_{кз}, \quad (1.13)$$

$$\omega_{и} = \omega_{вк} p\{V_{вк} \geq V_{п}\} = \omega_{вк} p(I/BK) = \omega_{вк} \int_{V_{п}}^{V_{вк}^{\max}} c(V_{вк}) dV_{вк}. \quad (1.14)$$

По мнению Якоба Д. (а также автора диссертации), возможность оценки технического несовершенства РЗ показателями  $\omega_o$  и  $\omega_{и}$  является важнейшим преимуществом вероятностного подхода. Но в то же время, как отмечает Якоб Д., практическое определение этих показателей наталкивается на трудности, связанные с вычислением плотностей распределения  $c(V_{кз})$  и  $c(V_{вк})$ . Известны попытки их определения аналитическим путем для радиальных сетей [43], однако в общем случае предложенный в [43] метод не решает задачу.

Аналогичный подход к расчету вероятностей отказа в срабатывании и излишних действий рассмотрен в современных работах Шалина А.И. [45] и Куликова А.Л. [55]. В связи с тем что, как видно из рисунка 1.1, уменьшение параметра срабатывания приводит к увеличению условной вероятности излишних действий  $p(I/BK)$  и уменьшению вероятности отказа  $p(O/KЗ)$  и наоборот – увеличение параметра срабатывания приводит к уменьшению  $p(I/BK)$  и увеличению  $p(O/KЗ)$ , можно решать, в соответствии с терминологией [46], задачу оптимизации параметра реагирования (т.к. одновременное выполнение  $p(O/KЗ) = 0$  и  $p(I/BK) = 0$  в большинстве случаев не удастся). За

цель оптимизации Шалин А.И. предлагает принять максимальное повышение эффективности защиты или минимизацию потери эффективности защиты  $M[\mathcal{E}]$  из-за неидеального технического совершенства. Величину  $M[\mathcal{E}]$  Шалин А.И. предлагает рассчитывать по следующему выражению [45]:

$$M[\mathcal{E}] = p(\text{И/ВК}) \cdot \omega_{\text{вк}} \cdot \kappa_{\text{и}} + p(\text{О/КЗ}) \cdot \omega_{\text{кз}} \cdot \kappa_{\text{о}}, \quad (1.15)$$

где  $\kappa_{\text{и}}$  и  $\kappa_{\text{о}}$  – «стоимости» одного излишнего срабатывания и отказа соответственно, определяются применительно к конкретному защищаемому объекту при использовании конкретного устройства.

Тогда критерий выбора оптимального решения:

$$M[\mathcal{E}] = \min. \quad (1.16)$$

Как и Якоб Д., Шалин А.И. также отмечает трудоемкость и даже невозможность расчета вероятностей излишних действий и отказов срабатывания [39, 45], из-за чего пользоваться данным критерием на практике проблематично.

#### **1.4 Выводы по главе**

На основании представленного в главе обзора можно выделить ряд ключевых вопросов, определивших направление исследований данной работы и свидетельствующих о ее актуальности:

1. В настоящее время системы РЗА основаны на метрологическом принципе, при котором в качестве контролируемых сигналов используются базовые электрические величины (ток и напряжение) и их производные и преобразованные величины (мощность, симметричные составляющие трехфазной системы и др.). При этом все системы РЗА можно подразделить на потоковые и полевые. Токовые релейные защиты (МТЗ и СТЗ) относятся к потоковым системам. Метрологический принцип и потоковый характер токовых РЗ обуславливают непосредственную связь селективности и чувствительности данного вида РЗ с величиной параметра реагирования, корреляция между которыми определяет функционально-метрологические потери РЗ и их вид (отказы в срабатывании, ложные и излишние действия).

2. Функционально-метрологические потери обусловлены использованием детерминированного экспертно-руководящего метода настройки РЗ в условиях случайного характера электрических величин и явлений в ЭЭС. В связи с невозможностью в ряде сложных и неоднозначных случаев прямого следования детерминированным указаниям возникают потери настройки РЗ, связанные с невыполнением требования селективности (излишние и ложные действие) или чувствительности (отказы срабатывания).

3. В существующих подходах оценки качества функционирования РЗ учитывается либо совокупность всевозможных потерь (аппаратурных потерь, потерь из-за влияния внешней среды, потерь из-за ошибок эксплуатационного и монтажного персонала, функциональных потерь), либо только аппаратурные потери. При этом и в том, и в другом случае отмечается трудоемкость соответствующих расчетов. В результате единственным практически используемым показателем качества функционирования РЗ в настоящее время является процент правильных действий, посредством которого рассчитывается надежность РЗ. Рассмотренные вероятностно-статистические подходы к оценке функционально-метрологических потерь РЗ, составляющих по разным оценкам от 8 до 40% от общего числа потерь, также не получили должного распространения ввиду сложности или невозможности расчетов законов распределения вероятностей соответствующих электрических величин.

4. В соответствии с предыдущими пунктами можно сделать вывод о целесообразности разработки критерия оценки эффективности функционирования РЗ, учитывающего все функционально-метрологические потери, связанные с неэффективной настройкой РЗ. При этом для обеспечения удобства и доступности его использования критерий должен учитывать только указанные функционально-метрологические потери. Данный критерий при условии прямой функциональной зависимости от величины параметра реагирования РЗ возможно использовать для оптимизации настройки (уставок) РЗ как перед вводом в эксплуатацию, так и в процессе эксплуатации. Данная настройка, при использовании вероятностно-статистического аппарата, обеспечит учет случайного характера электрических

величин, что по сравнению с существующим детерминированным подходом является более объективным, принимая во внимание вероятностные свойства многих процессов в ЭЭС. Для достижения данных свойств критерий должен быть основан на использовании достаточно представительной статистике.

## ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КРИТЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ

Рассмотренная в первой главе классификация свойств РЗ с помощью надежности, технического совершенства и эффективности функционирования, предложенная Зейлидзоном Е.Д., Смирновым Э.П. и Федосеевым А.М. [11, 1], полностью учитывает все аспекты функционирования. Однако, как это было показано, прямое использование данных критериев для оценки качества функционирования РЗ наталкивается на непреодолимые трудности, обусловленные сложностью, а иногда и невозможностью расчета. В связи с этим необходимо дальнейшее уточнение и раскрытие данных критериев.

В работе автором рассматривается один из наиболее важных аспектов функционирования РЗ – наличие функционально-метрологических потерь, обусловленных метрическим принципом функционирования РЗ, ее настройкой и функционированием сети. Соответственно разрабатывается критерий, учитывающий только указанные функционально-метрологические потери, который целесообразно назвать критерием технической эффективности ( $E_*$ ) релейной защиты и определить как отношение технического эффекта  $E$ , представляющего собой разность потенциального эффекта (ПЭ) и потерь (П), к потенциальному эффекту (2.1):

$$E_* = \frac{E}{\text{ПЭ}} = \frac{\text{ПЭ} - \text{П}}{\text{ПЭ}}. \quad (2.1)$$

В соответствии с рассмотренной в первой главе классификацией свойств РЗ данный критерий находится на высшем уровне активности и является частью эффективности функционирования (рисунок 2.1).

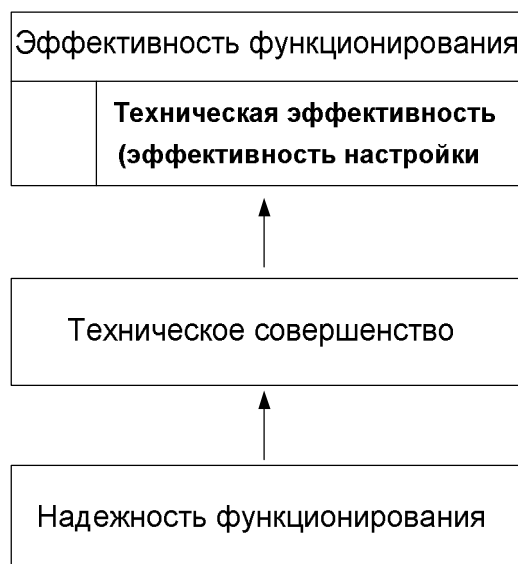


Рисунок 2.1 – Иерархия свойств РЗ

Дальнейшее раскрытие данного критерия для каждого вида РЗ осуществляется в соответствии с общими положениями критерия технической эффективности РЗ [56-69], изложенными ниже.

## 2.1 Представление технического эффекта через вероятностные меры

Релейная защита предназначена для фиксации и устранения редкостных случайных событий коротких замыканий на защищаемых объектах. Возникающие при этом потери  $\Pi$  (2.1) (отказы срабатывания, ложные и излишние действия) являются также случайными. В связи с этим, технический эффект  $E$  выражается в виде вероятностных характеристик или показателей. Следовательно, потенциальный эффект ПЭ (2.1), т.е. то, что должна фиксировать РЗ, а именно, короткие замыкания, должно быть выражено в вероятностной мере состояния КЗ, которое должно быть обнаружено и ликвидировано релейной защитой.

Потери эффекта являются существенно более редкими по сравнению с потенциальным эффектом. Поэтому прямое определение вероятности событий потерь 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 [70, 71] вероятность редкостного события находят как произведение вероятности базового представительного события на условную вероятность редкостного события, если последняя может быть найдена или назначена на основании знания сущности предмета:

$$p(C_{\text{ред}}) = p(C_{\text{ред}} / C_{\text{пр}}) \cdot p(C_{\text{пр}}), \quad (2.2)$$

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

Таким образом, вероятности потерь отказов срабатывания и излишних действий расчетным путем можно определить через вероятности соответственно внутренних и внешних КЗ, а вероятности потерь ложных действий – через вероятности соответственно рабочих эксплуатационных режимов, ненормальных асинхронных и неполнофазных режимов и т.д., которые являются более представительными по сравнению с ложными действиями в этих режимах. Формула, примененная для определения вероятностей редкостных событий как вероятность произведения (совмещений) случайных событий, является базовой в теории вероятностей. Однако качество этой формулы для вероятностей редкостных событий отмечено в данной работе впервые в связи с тем, что разработан метод селекции границ интервалов исходных и выходных данных (СГИД) [72], позволяющий для любых функциональных зависимостей определять законы распределения вероятностей (ЗРВ) результата функциональной зависимости любой размерности по ЗРВ аргументов этой зависимости.

Раскроем выражение (2.1). В обобщенном виде, события и условия функционирования РЗ можно представить следующей диаграммой Вьенна.

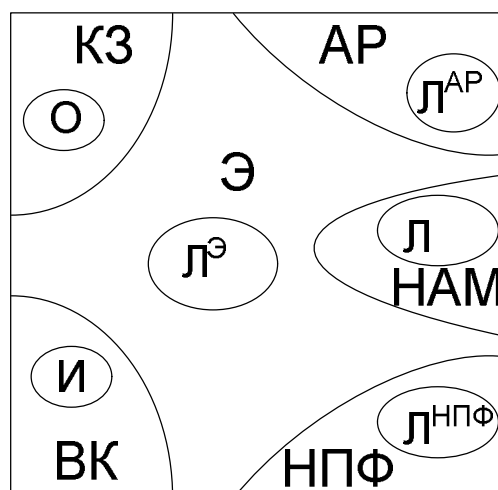


Рисунок 2.2 – Диаграмма Вьенна событий и условий функционирования РЗ: короткое замыкание КЗ и отказы О; внешнее короткое замыкание ВК и излишние действия И; асинхронный режим АР, неполнофазный режим НПФ, броски намагничивающих токов трансформатора НАМ, эксплуатационный режим Э и соответствующие им ложные действия  $Л^{АР}$ ,  $Л^{НПФ}$ ,  $Л^Э$ ,  $Л^{НАМ}$

Составляющие технического эффекта выражаются в соответствии с приведенной диаграммой, причем сделано это может быть в двух вероятностных мерах: вероятностях указанных событий или параметрах потоков их совершения. В первом случае вероятности всех событий, входящих в выражение технического эффекта, должны определяться в одних и тех же условиях. Во втором случае параметры потоков событий всегда удовлетворяют этим условиям, т.е. являются безусловными показателями.

В общем случае, параметр потока характеризует событие перехода из одного состояния в интересующее состояние, а вероятность – состояние после перехода в течение интересующего времени, определяемого сутью и логикой интересующей практической задачи. Параметр потока – разовая мгновенная, а вероятность – обобщенно-временная характеристика, учитывающая последствие состояния, возникшего после произошедшего события (перехода), например, КЗ. Для одного параметра потока может быть несколько вероятностей, определяемых интересующими временами последствия. Так, событие КЗ является началом разных состояний в зависимости от времени их

существования. Например, в течение времени действия аппаратуры РЗ состояние характеризует обнаружительную способность РЗ, в течение времени отключения КЗ состояние определяет способность прекращения разрушительного действия КЗ, а в течение времени восстановления участка, например, поврежденной линии – дает представление о структуре аварийного ремонта оборудования и сетей, который необходимо обеспечить.

Параметры потока получают либо непосредственно в наблюдениях как статистические данные, либо расчетным путем как произведение условных вероятностей интересующих событий и известных (найденных ранее) параметров потоков других событий, приводящих к состояниям или условиям, в которых интересующие события могут произойти. Тогда разности потенциального эффекта и потерь в потоковой мере дадут технический эффект в виде параметра потока  $\omega^E$  правильных действий аппаратуры РЗ:

$$\omega^E = \omega^{кз} - \omega^o - \omega^{лэ} - \omega^{лар} - \omega^{лнпф} - \omega^{лнам} - \omega^и, \quad (2.3)$$

где верхние индексы обозначают принадлежность параметров потоков к событиям: кз – потенциального эффекта в виде коротких замыканий, который возлагается на функционирование РЗ, о – отказов срабатывания; л – ложных действий: в эксплуатационных условиях – э, в асинхронных режимах – ар, в непереходнофазных режимах линий – нпф, при бросках тока намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов – нам, излишних действий при КЗ на внешних объектах – и. Параметр потока КЗ  $\omega^{кз}$  является достаточно представительной статистической величиной, приводимой в справочной литературе [73]. Данные для получения других составляющих (потерь) также приводятся в отчетной статистике энергосистем. Однако статистически они менее представительны, при этом ложные действия РЗ даются в целом, без распределения на состояния (условия), в которых они формируются, а излишние действия хотя иногда и приводятся [73], однако данные эти весьма опосредованы, так как излишние действия РЗ существенно зависят от развитости внешних элементов, присоединенных к расчетным выводам или

концам защищаемого объекта. В связи с этим целесообразно определять параметры потоков потерь как произведения соответствующих условных вероятностей потерь на параметры потоков условий (состояний), в которых они совершаются (по формуле (2.2)), т.е.

$$\omega^o = p(O/KЗ)\omega^{KЗ}, \quad (2.4)$$

$$\omega^{\text{л}^3} = p(\text{Л}^3/\text{Э})\omega^{\text{Э}}, \quad (2.5)$$

$$\omega^{\text{лар}} = p(\text{Л}^{\text{ар}}/\text{АР})\omega^{\text{АР}}, \quad (2.6)$$

$$\omega^{\text{лнпф}} = p(\text{Л}^{\text{нпф}}/\text{НПФ})\omega^{\text{НПФ}}, \quad (2.7)$$

$$\omega^{\text{нам}} = p(\text{Л}^{\text{нам}}/\text{НАМ})\omega^{\text{НАМ}}, \quad (2.8)$$

$$\omega^{\text{и}} = p(\text{И}/\text{ВК})\omega^{\text{ВК}}, \quad (2.9)$$

где О, Л, И – события отказов, ложных, излишних действий, КЗ – состояние короткого замыкания, повреждения, возмущения в составе защищаемого объекта; Э, АР, НПФ, НАМ, ВК и  $\omega^{\text{Э}}$ ,  $\omega^{\text{АР}}$ ,  $\omega^{\text{нпф}}$ ,  $\omega^{\text{нам}}$ ,  $\omega^{\text{ВК}}$  – состояния и параметры потоков эксплуатационных условий, асинхронного, неполнофазного режимов, бросков тока намагничивания, внешних коротких замыканий. Целесообразность обусловлена возможностью определения как условных вероятностей:  $p(O/KЗ)$ ,  $p(\text{Л}^3/\text{Э})$ ,  $p(\text{Л}^{\text{ар}}/\text{АР})$ ,  $p(\text{Л}^{\text{нпф}}/\text{НПФ})$ ,  $p(\text{Л}^{\text{нам}}/\text{НАМ})$ ,  $p(\text{И}/\text{ВК})$ , так и параметров потоков:  $\omega^{\text{Э}}$ ,  $\omega^{\text{АР}}$ ,  $\omega^{\text{нпф}}$ ,  $\omega^{\text{нам}}$ ,  $\omega^{\text{ВК}}$ . Использование статистических данных для определения указанных условных вероятностей практически невозможно, так как, с одной стороны, ряд событий (ложные действия при разных условиях) объединены, с другой стороны, в качестве условий использованы не разные состояния или условия: КЗ, Э, АР, НПФ, НАМ, ВК, а неправильные действия РЗ. Поэтому остается только расчетный путь, который реализуется посредством рассматриваемого далее метода СГИД [72], позволяющего формировать законы распределения вероятностей или определять их параметры при любых условиях и таким образом находить значения условных вероятностей. Что касается параметров потоков состояний, то статистически весьма представительный параметр потока КЗ  $\omega^{KЗ}$  может

использоваться для определения параметра потока неполнофазных режимов  $\omega^{\text{нпф}}$  как процент однофазных КЗ на землю, который также весьма представительен; параметр потока асинхронных режимов  $\omega^{\text{ар}}$  вычисляется как обратная величина средней периодичности возникновения асинхронного хода (средней продолжительности между правильными срабатываниями автоматики ликвидации асинхронного режима)  $m(T^{\text{алар-м}})$ , вычисляемой по весьма представительной отчетной годовой статистике. Параметр потока бросков тока намагничивания  $\omega^{\text{нам}}$  фактически равен параметру потока действий дифференциальной защиты трансформатора или автотрансформатора  $\omega^{\text{кзт}}$ , когда отключаются все его выключатели, а затем после ремонта требуется включение под напряжение на холостой ход с какой-либо стороны, т.е. можно положить  $\omega^{\text{нам}} = \omega^{\text{кзт}}$ . Среднюю продолжительность существования состояния формирования и исчезновения состояния броска тока намагничивания  $m(T^{\text{нам}})$  можно принять равной половине секунды, выраженной в годах. Путем формирования областей действия измерительного органа анализируемой РЗ на пространстве областей действия измерительных органов РЗ внешних элементов (на графике плотности распределения вероятностей данное пространство представляет собой ось параметра реагирования) находятся усредненные значения  $\omega^{\text{вк}}$  для каждого внешнего элемента. Путем эквивалентирования ненормальных состояний находится приближенно расчетное значение параметра потока выхода из эксплуатационного состояния  $\omega^3$ , обратно пропорциональное среднему арифметическому математических ожиданий длительности состояний короткого замыкания, асинхронного режима, бросков тока намагничивания, неполнофазного режима и внешнего короткого замыкания.

Выражение технического эффекта через вероятности состояний аналогично выражению технического эффекта через параметры потоков событий:

$$E = p(KЗ) - p(O) - p(Л^o) - p(Л^{ap}) - p(Л^{нпф}) - p(Л^{нам}) - p(И) = \\ p(KЗ) - p(O/KЗ)p(KЗ) - p(Л^o/Э)p(Э) - p(Л^{ap}/AP)p(AP) - p(Л^{нпф}/НПФ)p(НПФ), \quad (2.10) \\ - p(Л^{нам}/НАМ)p(НАМ) - p(И/ВК)p(ВК)$$

где безусловные вероятности состояний:

$$p(KЗ) = \omega^{KЗ} m(T^{PЗ}), \quad (2.11)$$

$$p(AP) = \omega^{ap} m(T^{ap}), \quad (2.12)$$

$$p(НПФ) = \omega^{нпф} m(T^{oапв}), \quad (2.13)$$

$$p(НАМ) = \omega^{нам} m(T^{нам}), \quad (2.14)$$

$$p(ВК) = \omega^{вк} m(T^{впз}), \quad (2.15)$$

за исключением  $p(Э)$ , определяются как произведения параметров потоков состояний на средние продолжительности их реального существования или времени действия:  $m(T^{PЗ})$  – PЗ защищаемого объекта,  $m(T^{впз})$  – PЗ внешних относительно защищаемого объекта элементов сети,  $m(T^{ap})$  – автоматики ликвидации асинхронного режима (АЛАР),  $m(T^{oапв})$  – однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Вероятность пребывания в эксплуатационном состоянии:

$$p(Э) = 1 - p(KЗ) - p(AP) - p(НПФ) - p(НАМ) - p(ВК), \quad (2.16)$$

находится как вероятность противоположного состояния относительно ненормальных состояний, учитываемых на защищаемом объекте, так как с одной стороны, параметр потока данного состояния найден приближенно, а с другой стороны, непосредственно данные для определения средней продолжительности эксплуатационного состояния  $m(T^э)$  в отчетной статистике не приводятся, и найти их по оперативной информации практически невозможно.

Приведенные формулы безусловных параметра потока и вероятности излишних действий каналов (ступеней) PЗ воспроизводят только обобщенную направленность действий, однако для практических вычислений выражения

должны быть развернуты применительно к каждому конкретному каналу РЗ с учетом развитости примыкающих сетей на концах (выводах) защищаемого объекта. Основой для формирования излишних действий анализируемой РЗ рассматриваются как действия, так и отказы действия защит на внешних элементах. При действии защит на внешних элементах, если уставка рассматриваемой РЗ оказалась не отстроена от них, действует и анализируемая РЗ, поэтому при равных временах действия за излишние действия можно принять половину правильных действий предыдущих РЗ. Соответственно отказы действия защит на внешних элементах для ступенчатых РЗ в этих условиях являются в чистом виде излишними действиями анализируемой РЗ.

## **2.2 Метод селекции границ интервалов данных для вычисления законов распределения вероятностей**

Использование статистических данных в существующих подходах к оценке качества функционирования РЗ имеет недостатки, связанные с малой представительностью, оперативностью и информативностью соответствующих данных. Недостатки обусловлены в связи с использованием редкостной ретроспективной статистики работы релейной защиты. Распределение такой статистики на различные факторы (причины) улучшает информативность, однако усугубляет остальные названные недостатки, т.к. статистика становится еще беднее. Статистика релейной защиты зависит от характеристик и параметров электрических сетей, а ретроспективная статистика отражает функционирование сетей и аппаратуры РЗ в прошлом, когда топология, характеристики и параметры сетей и аппаратуры были иными. Для решения любых функциональных задач, в том числе и оценки технического эффекта и технической эффективности РЗ, такая статистика вчерашнего дня малопригодна, особенно в настоящее время бурного развития техники, технологии, эксплуатационных систем, в том числе энергосистем и релейной защиты.

Параметры режимов энергосистем (потоки мощностей по ветвям, величины и углы напряжений в узлах установившихся режимов, вынужденные синусоидальные величины и углы токов в ветвях и остаточных напряжений в узлах при КЗ) являются функциями десятков, сотен и даже нескольких тысяч аргументов, например, активных и реактивных мощностей нагрузочных узлов, активных мощностей и уровней напряжения генераторных узлов и т.д. Из чего следует, что использование статистических испытаний [70] для получения законов распределения вероятностей в данном случае представляет собой достаточно трудоемкую (а иногда – практически невыполнимую) задачу. Поэтому для формирования ЗРВ, определения их параметров используется метод селекции границ интервалов входных и выходных данных [72], который применим для многомерных функций любой размерности как детерминированных или неслучайных, так и случайных.

Метод СГИД позволяет по заданным ЗРВ исходных данных (аргументов) функциональных зависимостей любой размерности и любого вида (явных, неявных, детерминированных, случайных) определять ЗРВ результатов применения названных функциональных зависимостей. Исследования [72, 74, 75] показали, что наибольшие отклонения функции распределения вероятностей (ФРВ) ЗРВ по методу СГИД от истинной ФРВ имеют место в средней части ФРВ, а в хвостовых частях ФРВ, т.е. при малых и больших значениях результатов применения функциональных зависимостей от аргументов в ФРВ по методу СГИД и истинной ФРВ практически разницы нет.

Метод СГИД основан логическом предположения, состоящего 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. Однако реализация данного предположения в чистом виде невозможна, т.к. в распределении вероятностей как

аргументов, так и результатов имеют место разные значения названных случайных величин с одинаковыми вероятностями. Поэтому приходится искать пути устранения (точнее обхода) данного недостатка. С определенными потерями этого удастся достичь путем использования ФРВ аргументов и результата их функциональной обработки. Отличительной особенностью ФРВ является неубывание этой полной вероятностной характеристики при однонаправленном изменении значений случайной величины. Благодаря этому достигается однозначность между значениями каждой случайной величины и вероятностью неперевышения этих значений, т.е. ФРВ. Уточненная суть метода СГИД при этом выражается так, что если все исходные данные (аргументы) задать при одной и той же вероятности неперевышения этих значений, т.е. ФРВ, то вероятностная характеристика результата применения функциональной обработки аргументов будет связана с вероятностью неперевышения значений аргументов [72].

Практическое применение метода СГИД возможно с использованием квантилей конкретного порядка, т.е. значений случайных величин как аргументов ФРВ с порядками, определяемыми значениями непосредственно ФРВ. Таким образом, значение каждого квантиля характеризуется порядком, т.е. значением ФРВ, соответствующему квантилю как аргументу ФРВ. При этом наблюдаемая неконтролируемая ошибка при построении ФРВ функциональной зависимости в средней части ее значений может быть уменьшена, если известен вид ЗРВ функциональной зависимости. Тогда для определения, как правило, небольшого количества (один–три) параметров наиболее распространенных и используемых ЗРВ (например, нормальный, равномерный, экспоненциальный и др.) можно использовать наиболее точные значения ФРВ функциональной зависимости при самых больших и самых малых значениях последней и получать значения ФРВ по методу СГИД с малыми отклонениями ФРВ от истинной кривой. Благодаря тому, что режимные параметры (токи, напряжения, мощности и другие электрические

величины) в рабочих, ненормальных и аварийных режимах энергосистем распределены по двухпараметрическому нормальному ЗРВ, достаточно точное расчетное определение параметров этого ЗРВ по методу СГИД может быть найдено с помощью равноточных, близких к единице или к нулю, значениях ФРВ при симметрично и гарантированно удаленных значениях функциональной зависимости.

Таким образом, благодаря использованию метода СГИД может быть решена с достаточной степени точности проблема определения ЗРВ электрических величин.

### **2.3 Нормальный закон распределения вероятностей**

Как было показано, наиболее точные результаты метод СГИД дает при малых и больших значениях диапазона случайных величин и при известном 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 [71, 76-80].

Суть центральной предельной теоремы и разнообразных ее форм состоит в том, что если случайная величина формируется из суммы случайных компонентов с любыми законами распределения, соизмеримых по дисперсиям, независимых или не сильно коррелированных между собой (не обязательное условие), то с ростом числа компонентов закон распределения случайной величины стремится к нормальному.

Соответственно, нормальное распределение электрических величин обусловлено формированием величин как суммы большого количества составляющих непосредственно (например, нагрузки электрических узлов на периодах стационарности) или как многомерных функциональных зависимостей от большого количества аргументов (например, потоков мощностей в ветвях в зависимости от тех же активных и реактивных мощностей электрических узлов). Функциональные зависимости параметров

режимов энергосистем от заданных узловых токов в виде токов в ветвях и напряжений в узлах являются линейными, а в виде, например, потоков мощностей в ветвях в зависимости от активных и реактивных мощностей нагрузочных и генераторных узлов – нелинейными. В обоих случаях искомые электрические величины (параметры режимов) формируются как суммы большого числа слагаемых, в первом случае линейной функциональной зависимости от заданных токов, а во втором – составляющих линейной комбинации степенного разложения нелинейной функциональной зависимости. Благодаря этому в обоих случаях оказываются обеспеченными условия нормального распределения вероятностей электрических величин: в первом случае более, а во втором – менее точно. При этом точность воспроизведения нормального распределения возрастает по мере увеличения количества аргументов. Что касается большого количества аргументов, то оно свойственно для электрических величин всех объектов энергосистем (например, для Тюменской энергосистемы количество нагрузочных узлов превышает 1200).

Использование нормального ЗРВ и метода СГИД позволяет достаточно просто определить параметры ЗРВ интересующей электрической величины с помощью «правила трех сигма» [71]. Согласно данному правилу, практически возможные значения нормально распределенной случайной величины лежат в диапазоне  $m(X) \pm 3\sigma(X)$  (рисунок 2.3).

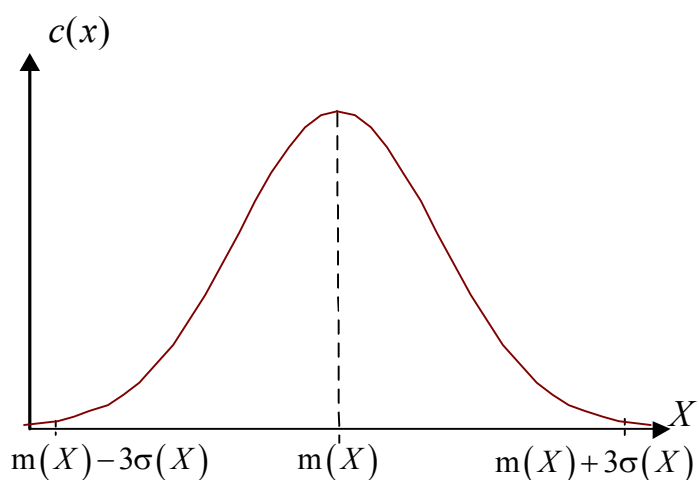


Рисунок 2.3 – Определение ЗРВ

Найдем функцию распределения для границ данного интервала. ФРВ нормального закона имеет вид [71]:

$$f(x) = 0,5 + \Phi \left[ \frac{x - m(X)}{\sigma(X)} \right]. \quad (2.17)$$

Следовательно,

$$f[m(X) + 3\sigma(X)] = 0,5 + \Phi \left[ \frac{m(X) + 3\sigma(X) - m(X)}{\sigma(X)} \right] = 0,5 + \Phi[3], \quad (2.18)$$

$$f[m(X) + 3\sigma(X)] = 0,9987; \quad (2.19)$$

$$f[m(X) - 3\sigma(X)] = 0,5 + \Phi \left[ \frac{m(X) - 3\sigma(X) - m(X)}{\sigma(X)} \right] = 0,5 + \Phi[-3], \quad (2.20)$$

$$f[m(X) - 3\sigma(X)] = 0,0013; \quad (2.21)$$

Обозначив, величину  $m(X) + 3\sigma(X)$  как квантиль порядка  $p_1 = 0,9987$   $x_{p_1}$ , а величину  $m(X) - 3\sigma(X)$  как квантиль порядка  $p_2 = 0,0013$   $x_{p_2}$ , получим систему:

$$\begin{cases} m(X) + 3\sigma(X) = x_{p_1} \\ m(X) - 3\sigma(X) = x_{p_2} \end{cases}, \quad (2.22)$$

из которой следует, что

$$\begin{cases} m(X) = \frac{x_{p_1} + x_{p_2}}{2} \\ \sigma(X) = \frac{x_{p_1} - x_{p_2}}{6} \end{cases}. \quad (2.23)$$

Полученное выражение позволяет определить математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение искомой электрической величины, используя квантили  $x_{p_1}$ ,  $x_{p_2}$ , которые с высокой точностью вычисляются методом СГИД, т.к. находятся в хвостовых частях кривой ФРВ (здесь и далее случайная величина обозначается прописной буквой, ее значение – строчной).

Так как функциональная зависимость в электроэнергетических задачах в настоящее время обычно предстает в виде программы, например,

установившихся режимов (Дакар, Евростаг и др.), которая при малых исходных данных (квантилей порядка  $p_2=0,0013$ ) плохо воспроизводится (реализуется), либо требует специальной настройки, то в ряде случаев приходится отказываться от варианта малых исходных данных. В этом случае можно принять вариант исходных данных для порядка  $p_2$  как квантилей порядка меньше  $p_1=0,9987$ , например,  $p_2=0,99$ . Тогда, как это следует из (2.17),  $m(X)$ ,  $\sigma(X)$  рассчитываются по формулам

$$\begin{cases} m(X) = x_{p_1} - \sigma(X) \cdot \Phi^{-1}(p_1 - 0,5) \\ \sigma(X) = \frac{x_{p_1} - x_{p_2}}{\Phi^{-1}(p_1 - 0,5) - \Phi^{-1}(p_2 - 0,5)}, \end{cases} \quad (2.24)$$

где  $\Phi^{-1}$  – обратная функция Лапласа.

При использовании для расчета токов коротких замыканий программ АРМ СРЗА и ТКЗ 3000, сверхпереходные ЭДС в базе данных указанных программ должны быть рассчитаны для предшествующего короткому замыканию установившегося режима, соответствующего квантилям  $p_1$  и  $p_2$  параметров нагрузочных и генераторных узлов (активных и реактивных мощностей нагрузочных узлов, активных мощностей и напряжений генераторных узлов).

## 2.4 Выводы по главе

1. Представление критерия технической эффективности как отношения разности потенциального эффекта и потерь к потенциальному эффекту и учет исключительно функциональных потерь обуславливают его место в существующей классификации как части критерия эффективности функционирования.

2. Составляющие критерия могут быть выражены в двух вероятностных мерах: потоков событий и вероятностей состояний, при этом искомые составляющие вычисляются через произведение условной вероятности интересующего состояния и безусловной вероятности статистически

представительного другого состояния. Преимуществом такого подхода является использование для вычисления безусловной вероятности достаточно представительных статистических данных, а вычисление условной вероятности посредством расчетного метода СГИД, в отличие от чисто статистического подхода, позволяет учесть топологию сети, в которой функционирует оцениваемая защита, и режимно-коммутационные состояния данной сети, включая различные виды КЗ.

3. Нормальный закон распределения 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.

4. Сформулированные базовые положения критерия технической эффективности служат основой для разработки математического описания технической эффективности различных РЗ.

### **ГЛАВА 3. КРИТЕРИЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ТОКОВЫХ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ И МЕТОДИКА ВЫБОРА УСТАВОК**

Представленные во второй главе положения критерия технической эффективности РЗ могут быть использованы для всех типов РЗ. Особенности расчета технической эффективности для дифференциальных защит опубликованы в работе [80], однако как показал дальнейший анализ, с учетом замечаний изложенных в первой главе, актуальность расчета технической эффективности и оптимизации уставок для РЗ, основанных на дифференциальном принципе, имеет наименьшее значение в виду высоких эксплуатационных характеристик последних [45]. Что касается защит с высокочастотным обменном блокирующим сигналом по проводам линии, (являющихся расширением дифференциального принципа на пространственно-протяженные объекты), они имеют достоинства дифференциальных защит, а их техническая эффективность дополнительно повышается техническими мероприятиями, примером которых являются схемно-конструкторские решения автора, на которые получен патент [82]. Последняя работа основана на непрерывной передаче высокочастотного блокирующего сигнала по проводам выбранной фазы линии, предотвращая работу комплектов РЗ на всех концах линии в рабочих, асинхронных и неполнофазных режимах, что позволяет не отстраивать РЗ от рабочих токов, тем самым повышая чувствительность и техническую эффективность.

В соответствии с отмеченным и результатами исследования первой главы, наибольшую актуальность имеет оценка технической эффективности, оптимизация и повышение эффективности процесса выбора уставок для токовых защит, наиболее сложным видом которого является ступенчатая токовая защита нулевой последовательности (СТЗНП). Поэтому целесообразно раскрыть критерий технической эффективности для СТЗНП, а для других видов токовых РЗ, реагирующих на фазные величины, принимая во внимание общность расчетных выражений, допустимо только отметить особенности.

В соответствии с рассмотренным в первой главе экспертно-руководящим методом настройки [7], ступенчатые токовые защиты, в том числе нулевой последовательности, содержат не менее одного канала, который в этом случае является резервирующим. Количество каналов устанавливается исходя из конкретных условий и потребностей (топология, режимно-коммутационные условия сети и др.). Опыт, отраженный в ЭРМ для линий с двухсторонним питанием, требует как минимум три канала (ступени): резервирующий и два основных канала. Отечественные производители выпускают четырехступенчатые релейные комплексы, содержащие резервирующую (IV) и три основных ступени: первую (I), вторую (II), третью (III).

В этом виде первая ступень является наиболее быстродействующей, но охватывает только часть защищаемой линии, зона действия второй и третьей ступени распространяется на всю линию. Четвертая ступень именуется резервирующей, т.к. по своему назначению обеспечивает ближнее и дальнее резервирование; кроме того, выдержка времени данной ступени в отличие от других выбирается по встречно-ступенчатому принципу. Отмеченные особенности четвертой ступени определяют существенные отличия для расчета технической эффективности данного канала. Поэтому для наиболее компактного изложения раскрытие составляющих технического эффекта СТЗНП (3.1) для основных ступеней объединено в один раздел 3.1, а для четвертой – в другой раздел 3.2.

$$\begin{aligned}
 E = & p(K3) - p(O) - p(J^o) - p(J^{ap}) - p(J^{nnp}) - p(J^{nam}) - p(I) = \\
 & p(K3) - p(O/K3)p(K3) - p(J^o/\mathcal{E})p(\mathcal{E}) - p(J^{ap}/AP)p(AP) - p(J^{nnp}/НПФ)p(НПФ) \\
 & - p(J^{nam}/НАМ)p(НАМ) - p(I/BK)p(BK)
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

### 3.1 Техническая эффективность для основных ступеней токовой защиты нулевой последовательности

#### 3.1.1 Вероятность повреждения объекта (потенциальный эффект)

Вероятность повреждения объекта (обнаружения короткого замыкания релейной защитой)  $p(KЗ^j)$  для рассчитываемого  $j$ -го канала СТЗНП определяется в соответствии с (2.11):

$$p(KЗ^j) = \omega^{KЗ} m(T^j). \quad (3.2)$$

В этом выражении средняя продолжительность устранения КЗ релейной защитой численно равна математическому ожиданию времени действия рассчитываемого канала РЗ  $m(T^j)$ . Для первой ступени СТЗНП можно принять  $m(T^I) = 0,05$  с.

Параметр потока КЗ на защищаемом объекте  $\omega^{KЗ}$  для защиты, реагирующей на нулевую последовательность, равен

$$\omega^{KЗ} = \omega^{(1,4)} = [p(1)+p(4)] \cdot \omega_{уд} \cdot \frac{L}{100}, \quad (3.3)$$

где  $p(1)$  – вероятность однофазного КЗ по статистическим данным (в среднем для энергосистем равна 0,7);  $p(4)$  – вероятность двухфазного КЗ на землю по статистическим данным (в среднем для энергосистем равна 0,15);  $L$  – длина линии;  $\omega_{уд}$  – удельный параметр потока устойчивых и неустойчивых повреждений на 100 км длины линии. Принимается исходя из класса напряжения, материала опор и числа цепей [73]. Значения параметра потока на 100 км длины линии представлены в таблице ниже (учтены устойчивые и неустойчивые повреждения).

Таблица 3.1 – Параметр потока повреждений линии

| $U_{\text{НОМ}}, \text{кВ}$ | Материал опор | Число цепей          | $\omega_{\text{уд}}, 1/(\text{год} \cdot 100\text{км})$ |
|-----------------------------|---------------|----------------------|---------------------------------------------------------|
| 110                         | Металл        | Одна                 | 5,2                                                     |
|                             |               | Две (одна отключена) | 6,4                                                     |
|                             |               | Две (обе включены)   | 1                                                       |
|                             | Железобетон   | Одна                 | 2,8                                                     |
|                             |               | Две (одна отключена) | 3,4                                                     |
|                             |               | Две (обе включены)   | 1                                                       |
|                             | Дерево        | Одна                 | 6,8                                                     |
| 220                         | Металл        | Одна                 | 2                                                       |
|                             |               | Две (одна отключена) | 2                                                       |
|                             |               | Две (обе включены)   | 0,4                                                     |
|                             | Железобетон   | Одна                 | 1,4                                                     |
|                             |               | Две (одна отключена) | 2,4                                                     |
|                             |               | Две (обе включены)   | 0,4                                                     |
|                             | Дерево        | Одна                 | 2,4                                                     |
| 500                         | Металл        | Одна                 | 0,88                                                    |
|                             | Железобетон   | Одна                 | 0,72                                                    |

### 3.1.2 Вероятность отказа в срабатывании

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

$$p(O^j) = p(O^j / KЗ^j) p(KЗ^j). \quad (3.4)$$

Соответственно, определение данной вероятности сводится к расчету условной вероятности отказа при повреждении  $p(O^j / A^j)$ . Данная вероятность определяется аналогично рассмотренным в первой главе подходам [39, 45, 55] и соответствует площади под кривой на рисунке 3.1.

Как следует из рисунка 3.1, для определения вероятности  $p(O^j / A^j)$  необходимо знать закон распределения вероятностей тока нулевой последовательности при КЗ вдоль защищаемой линии. Принципиальное отличие от существующих подходов в определении данной вероятности заключается в использовании метода СГИД, а не статистических данных или метода статистических испытаний [83]. В соответствии со сделанными в предыдущем разделе выводами, метод СГИД дает наиболее точные результаты

при использовании известного закона распределения и квантилей порядков, находящихся в хвостовой части кривой ПРВ.

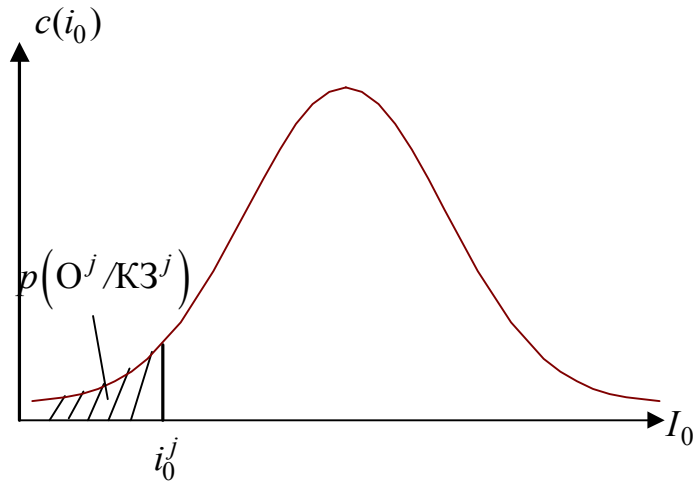


Рисунок 3.1 – Определение условной вероятности отказа защиты при КЗ на линии  $p(O^j / KЗ^j)$ :  $i_0^j$  - уставка рассматриваемого  $j$  канала РЗ.

Таким образом, вычисленная ПРВ в соответствии с нормальным законом определяется выражением

$$c(i_0) = \frac{1}{\sigma(I_0)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i_0 - m(I_0))^2}{2\sigma(I_0)^2}}, \quad (3.6)$$

а искомая вероятность численно равна ФРВ от уставки рассматриваемой ступени  $j$ :

$$p(O^j / KЗ^j) = f(i_0^j) = 0,5 + \Phi\left[\frac{i_0^j - m(I_0)}{\sigma(I_0)}\right], \quad (3.7)$$

где  $\Phi$  – функция Лапласа [71].

В соответствии со сказанным, параметры нормального ЗРВ тока нулевой последовательности (математическое ожидание  $m(I_0)$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma(I_0)$ ) при КЗ на пространстве линии равны

$$\begin{cases} m(I_0) = \frac{i_{0p1} + i_{0p2}}{2} \\ \sigma(I_0) = \frac{i_{0p1} - i_{0p2}}{6} \end{cases}, \quad (3.8)$$

где  $i_{0p1}$ ,  $i_{0p2}$  – требуемые по методу СГИД квантили порядков  $p1$  и  $p2$  тока нулевой последовательности.

Таким образом, вычисленная ПРВ в соответствии с нормальным законом определяется выражением

$$c(i_0) = \frac{1}{\sigma(I_0)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i_0 - m(I_0))^2}{2\sigma(I_0)^2}}, \quad (3.9)$$

а искомая вероятность численно равна ФРВ от уставки рассматриваемой ступени  $j$ :

$$p(O^j / K3^j) = f(i_0^j) = 0,5 + \Phi \left[ \frac{i_0^j - m(I_0)}{\sigma(I_0)} \right], \quad (3.10)$$

где  $\Phi$  – функция Лапласа [71].

### 3.1.3 Вероятность ложного срабатывания ступени в асинхронном режиме

Согласно стандарту [83] асинхронный режим – переходный режим, характеризующийся несинхронным вращением части генераторов энергосистемы. Возникновение асинхронного режима на линии сопровождается нарастанием угла сдвига фаз между ЭДС систем и, как следствие, токами асинхронного режима, которые по величине могут достигать тока трехфазного КЗ [84]. Небаланс на выходе фильтра нулевой последовательности может привести к ложным действиям РЗ. В критерии технической эффективности они учитываются выражением

$$p(\Pi^{apj}) = p(\Pi^{apj} / AP) p(AP). \quad (3.11)$$

В зависимости от допустимых условий влияний АР на объекты сети и возможности ресинхронизации, АР может существовать кратковременно, относительно длительно или быть недопустимым вообще. Поэтому для его

ликвидации используются устройства АЛАР, которые делятся на три группы в зависимости от допустимого времени ликвидации АР [85]:

- 1) быстродействующие неселективные устройства, не допускают достижения расхождения угла ЭДС до 180 градусов;
- 2) устройства, действующие при возникновении признаков нарушения синхронизма или в течение первого цикла асинхронного режима;
- 3) устройства, осуществляющие ресинхронизацию и действующие после нескольких циклов асинхронного режима.

Таким образом, математическое ожидание времени состояния асинхронного режима  $m(T^{ap})$  определяется установленным на линии типом АЛАР и может быть соответственно равна 0,1 с; 0,55-0,8 с (в приближенных расчетах и при неизвестном виде АЛАР принимается время скоординированное с временем действия второй ступени); 1 – 20 с.

Параметр потока асинхронного режима  $\omega^{ap}$  можно определить как величину, обратную средней продолжительности между правильными срабатываниями АЛАР  $m(T^{алар-м})$  (принимается по отчетной статистике, может быть приближенно принят 10,8 лет – статистика по Тюменской энергосистеме):

$$\omega^{ap} = \frac{1}{m(T^{алар-м})}. \quad (3.12)$$

Таким образом, известны все величины для определения безусловной вероятности асинхронного режима  $p(AP) = \omega^{ap} m(T^{ap})$  в соответствии с выражением (2.12).

Для определения условной вероятности  $p(L^{apj}/AP)$  необходимо знать ЗРВ небаланса нулевой последовательности в асинхронном режиме, который определяется через квантили соответствующих полных токов асинхронного режима  $i_{p1}^{ap}, i_{p2}^{ap}$ , определенных по методу СГИД, по выражениям

$$\begin{cases} m(I_0^{\text{ap}}) = \frac{i_{0p1}^{\text{ap}} + i_{0p2}^{\text{ap}}}{2} \\ \sigma(I_0^{\text{ap}}) = \frac{i_{0p1}^{\text{ap}} - i_{0p2}^{\text{ap}}}{6} \end{cases}, \quad (3.13)$$

где квантили тока нулевой последовательности при АР равны  $i_{0p1}^{\text{ap}} = \kappa_{\text{нб}} \cdot i_{p1}^{\text{ap}}$ ,  $i_{0p2}^{\text{ap}} = \kappa_{\text{нб}} \cdot i_{p2}^{\text{ap}}$ . Коэффициент небаланса тока нулевой последовательности  $\kappa_{\text{нб}}$

определяется классом точности и предельной кратностью тока трансформатора тока. В соответствии со стандартом МЭК (IEC60044-1) [86] для трансформаторов тока, используемых в РЗ, приняты два класса точности: 5 или 10 %. Предельная кратность тока является справочной величиной [73], для некоторых трансформаторов тока зависит от мощности нагрузки.

Коэффициент небаланса  $\kappa_{\text{нб}}$  может быть принят в соответствии с рекомендациями [7]. Для допустимо приближенного расчета с точки зрения решаемых задач может использоваться следующая система:

$$\kappa_{\text{нб}} = \begin{cases} 0,03 \text{ при } \frac{i_{0p1}^{\text{ap}}(i_{0p2}^{\text{ap}})}{i_{\text{номТТ}}} \leq 1 \\ 0,05 \text{ при } 1 < \frac{i_{0p1}^{\text{ap}}(i_{0p2}^{\text{ap}})}{i_{\text{номТТ}}} \leq 3 \\ 0,1 \text{ при } \frac{i_{0p1}^{\text{ap}}(i_{0p2}^{\text{ap}})}{i_{\text{номТТ}}} > 3 \end{cases}, \quad (3.14)$$

где  $i_{\text{номТТ}}$  - номинальный ток трансформаторов тока.

Зная ЗРВ можно определить искомую условную вероятность  $p(\text{Л}^{\text{apj}}/\text{АР})$ , что поясняет рисунок 3.2.

Из рисунка 3.2 следует, что искомая вероятность равна

$$p(\text{Л}^{\text{apj}}/\text{АР}) = 1 - f(i_0^j) = 0,5 - \Phi \left[ \frac{i_0^j - m(I_0^{\text{ap}})}{\sigma(I_0^{\text{ap}})} \right]. \quad (3.15)$$

В соответствии с изложенным выше, при определении данной вероятности также необходимо учитывать время действия АЛАР. Если время действия АЛАР меньше временной уставкой рассматриваемого канала РЗ, ложные действия данной ступени при АР невозможны и их вероятность следует принять равной нулю.

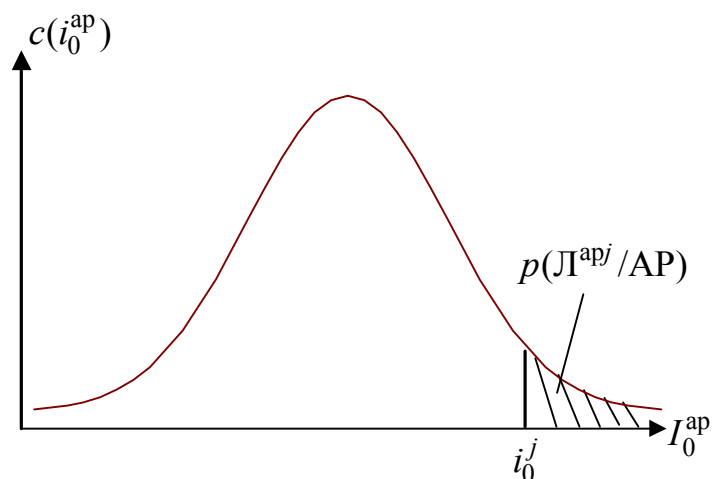


Рисунок 3.2 – Определение условной вероятности ложных действий при АР

$$p(L^{apj} / AP)$$

### 3.1.4 Вероятность ложного срабатывания ступени в неполнофазном режиме

Неполнофазный режим работы автоматизируемой линии, а также смежных и предыдущих линий, является несимметричным режимом, сопровождаемым токами нулевой последовательности, которые по величине могут превышать токи КЗ на землю. Данный режим возникает кратковременно при неодновременном включении фаз выключателя, существует дольше время в цикле ОАПВ при однофазных КЗ на линиях, оборудованных выключателями с пофазным приводом, а также в известных в прошлом случаях допустимой работы сети с двумя фазами (одна фаза в ремонте). Следовательно, при допустимости работы РЗ в неполнофазном режиме (когда нет необходимости по условиям чувствительности предусматривать схемные мероприятия по

выводу соответствующих ступеней из работы) необходимо учесть вероятные потери ложных действий в этом режиме по выражению

$$p(\Pi^{\text{нпф}}) = p(\Pi^{\text{нпф}}/\text{НПФ})p(\text{НПФ}), \quad (3.16)$$

Для определения безусловной вероятности состояния неполнофазного режима по выражению (2.13) –  $p(\text{НПФ}) = \omega^{\text{нпф}} m(T^{\text{оапв}})$  – необходимо знать параметр потока неполнофазного режима  $\omega^{\text{нпф}}$  и математическое ожидание времени его состояния  $m(T^{\text{оапв}})$ . При допущении, что неполнофазный режим возникает только при однофазном КЗ в цикле ОАПВ (неполнофазный режим при неравномерном замыкании контактов фаз можно не учитывать, так как разброс во времени составляет не более 10 мс),  $\omega^{\text{нпф}}$  определяется через параметр потока КЗ по выражению (3.17)

$$\omega^{\text{нпф}} = p(1) \cdot \omega_{\text{уд}} \cdot \frac{L}{100}, \quad (3.17)$$

а  $m(T^{\text{оапв}})$  временем действия автоматики однофазного повторного включения (при отсутствии информации об ОАПВ координируется с временем действия второй ступени). Искомая безусловная вероятность в соответствии с 2.13 определяется по выражению  $p(\text{НПФ}) = \omega^{\text{нпф}} m(T^{\text{оапв}})$ .

Ток неполнофазного режима квантилей порядка  $p_1=0,9987$  и  $p_2=0,0013$  определяется соответственно при предшествующем максимальном асинхронном режиме и минимальном эксплуатационном режиме, т.к. данные режимы дадут требуемые для квантилей нулевых токов  $i_{0p1}^{\text{нпф}}$ ,  $i_{0p2}^{\text{нпф}}$  максимальные и минимальные значения. Параметры нормального закона распределения определяются в соответствии с (3.18), искомая вероятность ложных действий в соответствии с рисунком 3.3 по выражению (3.19).

$$\begin{cases} m(I_0^{\text{нпф}}) = \frac{i_{0p1}^{\text{нпф}} + i_{0p1}^{\text{нпф}}}{2} \\ \sigma(I_0^{\text{нпф}}) = \frac{i_{0p1}^{\text{нпф}} - i_{0p1}^{\text{нпф}}}{6} \end{cases}, \quad (3.18)$$

Из рисунка 3.3 следует, что искомая вероятность равна

$$p(\text{Л}^{\text{нпф}j} / \text{НПФ}) = 1 - f(i_0^j) = 0,5 - \Phi \left[ \frac{i_0^j - m(I_0^{\text{нпф}})}{\sigma(I_0^{\text{нпф}})} \right]. \quad (3.19)$$

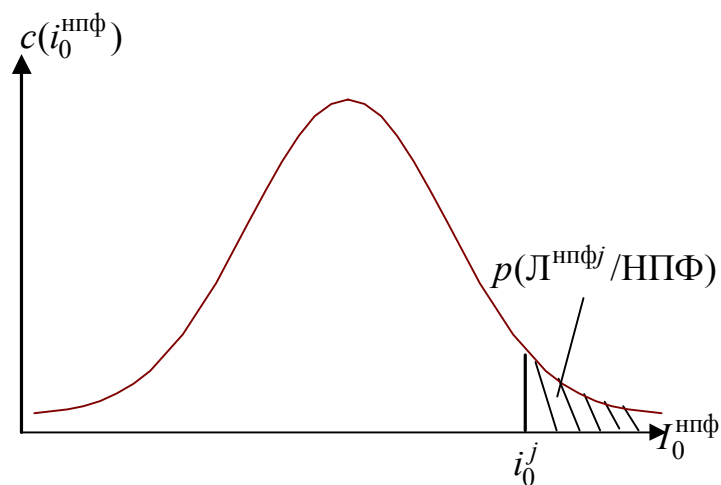


Рисунок 3.3 – Определение условной вероятности ложных действий в неполнофазном режиме  $p(\text{Л}^{\text{нпф}j} / \text{НПФ})$

Аналогично определению ложных действий при АР, необходимо учитывать время существования неполнофазного режима. Если оно меньше времени действия рассчитываемого канала РЗ, ложные действия ступени в этом режиме невозможны и их вероятность следует принять равной нулю.

### 3.1.5 Вероятность ложного срабатывания ступени при бросках тока намагничивания

В соответствии с руководящими указаниями при настройке РЗ линий, в том числе токовой защиты нулевой последовательности [7], необходимо учитывать бросок намагничивающего тока трансформаторов, включенных на подстанциях к которым подключены концы линий. Бросок намагничивающего

тока возникает при включении трансформаторов под напряжение или при восстановлении на них напряжения после отключения внешнего КЗ в обмотке, питающей трансформатор. Вероятность ложных действий в этом режиме определяется выражением (3.20), безусловная вероятность выражением (3.21).

$$p(\Pi^{\text{нам}j}) = p(\Pi^{\text{нам}j} / \text{НАМ})p(\text{НАМ}), \quad (3.20)$$

$$p(\text{НАМ}) = \omega^{\text{нам}} m(T^{\text{нам}}). \quad (3.21)$$

За параметр возникновения бросков тока намагничивания можно принять параметр потока возникновения повреждения в трансформаторе  $\omega^{\text{нам}} = \omega^{\text{тр}}$ . Математическое ожидание времени данного состояния  $m(T^{\text{нам}})$  можно с запасом принять равным 1 с [87].

ЗРВ тока намагничивания определим из следующих соображений. Согласно [7] бросок намагничивающего тока  $I^{\text{нам}}$  трансформатора определяется выражением (3.22):

$$I^{\text{нам}} = \frac{U^{\text{ном}}}{x_3}, \quad (3.22)$$

где  $U^{\text{ном}}$  – номинальное напряжение включения трансформатора;  $x_3$  – сопротивление, ограничивающее ток намагничивания (включает в себя эквивалентное сопротивление от источников до трансформатора и сопротивление обмотки, на которую подается питание).

Закон распределения вероятностей тока намагничивания трансформатора можно определить приближенно, зная ЗРВ напряжения включения трансформатора. За математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение напряжения включения трансформатора исходя из практических соображений можно принять номинальное напряжение и  $\pm 5\%$  от его величины соответственно:

$$\begin{cases} m(U^{\text{нам}}) = U_{\text{ном}} \\ \sigma(U^{\text{нам}}) = \frac{1,05 \cdot U_{\text{ном}} - 0,95 \cdot U_{\text{ном}}}{6} \end{cases} \quad (3.23)$$

Тогда в соответствии с [71] искомые параметры ЗРВ равны

$$\begin{cases} m(I^{\text{нам}}) = \frac{m(U^{\text{нам}})}{x_{\text{э}}} \\ \sigma(I^{\text{нам}}) = \frac{0,0167 \cdot U_{\text{ном}}}{x_{\text{э}}} \end{cases}, \quad (3.24)$$

Таким образом, условную вероятность ложных действий в этом режиме можно определить аналогично вероятности ложных действий в неполнофазном режиме по выражению (3.25).

$$p(\Pi^{\text{нам}j} / \text{НАМ}) = 1 - f(i_0^j) = 0,5 - \Phi \left[ \frac{i_0^j - m(I^{\text{нам}})}{\sigma(I^{\text{нам}})} \right]. \quad (3.25)$$

Если время действия ступени превышает время состояния  $m(T^{\text{нам}})$ , вероятность ложных действий следует принять равной нулю.

### 3.1.6 Вероятность ложного срабатывания ступени в эксплуатационном режиме

Искомая вероятность  $p(\Pi^{\text{э}})$  определяется по выражению

$$p(\Pi^{\text{э}}) = p(\Pi^{\text{э}} / \text{Э}^j) p(\text{Э}^j). \quad (3.26)$$

Безусловная вероятность эксплуатационного режима  $p(\text{Э}^j)$  определяется в соответствии с выражением (2.16). Условная вероятность  $p(\Pi^{\text{э}} / \text{Э}^j)$  определяется при небалансе нулевой последовательности, аналогично выражениям для расчета вероятности ложных действий при АР. Квантили небаланса нулевой последовательности  $i_{0p1}^{\text{э}}$  и  $i_{0p2}^{\text{э}}$  определяются через небаланс в условиях максимального и минимального эксплуатационного режима, характеризуемого квантилями фазных токов  $i_{p1}^{\text{э}}$  и  $i_{p2}^{\text{э}}$ . Коэффициент небаланса рассчитывается аналогично системе (3.11).

Таким образом, параметры нормального ЗРВ вычисляются по выражению (3.27), условная вероятность в соответствии с рисунком 3.4 по выражению (3.28).

$$\begin{cases} m(I_0^3) = \frac{i_{0p1}^3 + i_{0p2}^3}{2} \\ \sigma(I_0^3) = \frac{i_{0p1}^3 - i_{0p2}^3}{6} \end{cases}, \quad (3.27)$$

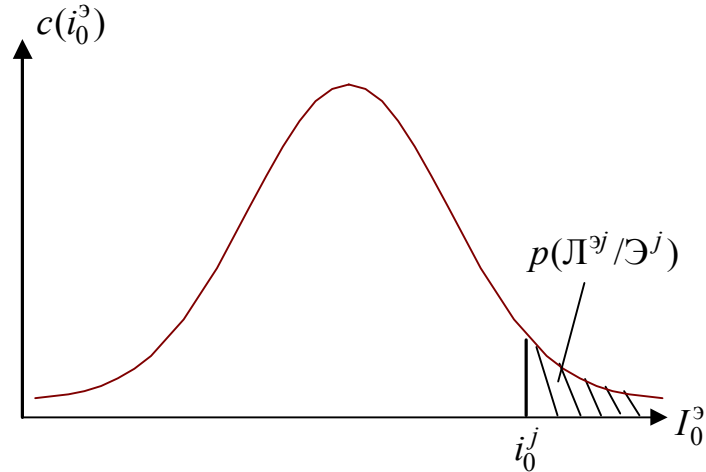


Рисунок 3.4 – Определение условной вероятности ложных действий в эксплуатационном режиме  $p(\text{Л}^j/\text{Э}^j)$

$$p(\text{Л}^j/\text{Э}^j) = 1 - f(i_0^j) = 0,5 - \Phi \left[ \frac{i_0^j - m(I_0^3)}{\sigma(I_0^3)} \right]. \quad (3.28)$$

### 3.1.7 Вероятность излишнего срабатывания ступени

Излишние действия РЗ возникают при взаимодействии рассчитываемой ступени РЗ с сонаправленными ступенями РЗ предыдущих элементов. Для их иллюстрации рассмотрим фрагмент электрической сети (рисунок 3.5).

Для основных ступеней излишние действия рассматриваются при КЗ на линиях первой периферии. В соответствии с общими положениями критерия технической эффективности и приведенным рисунком 3.5 искомая вероятность определяется выражением (3.29).

$$p(\text{И}^j) = \sum_{\Pi} p(\text{И}_{\Pi}^j/\text{ВК}_{\Pi}^j) p(\text{ВК}_{\Pi}^j). \quad (3.29)$$

Как следует из выражения, излишние действия необходимо рассчитать при КЗ на каждой линии первой периферии.

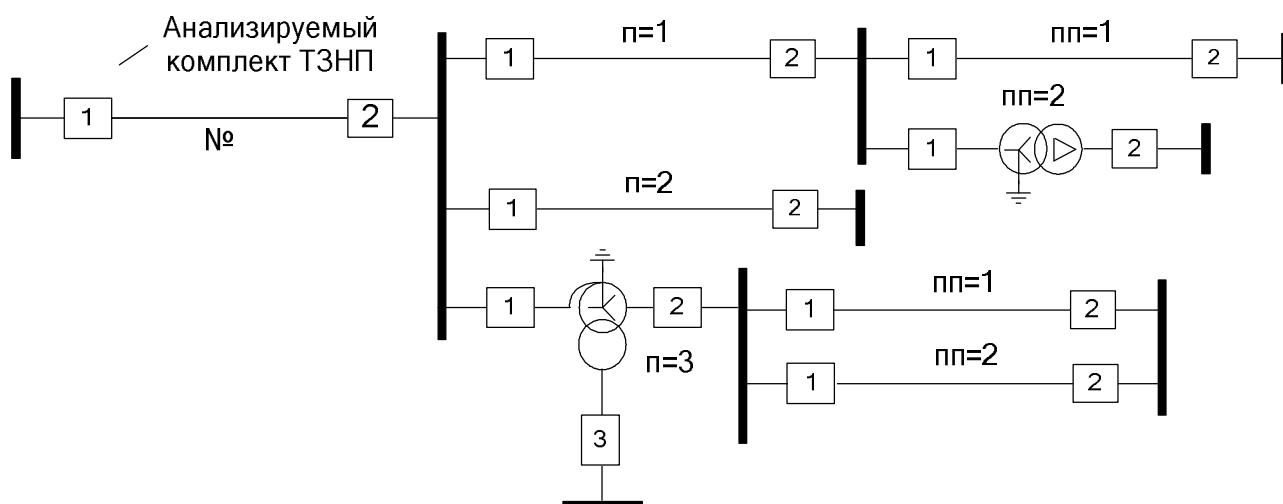


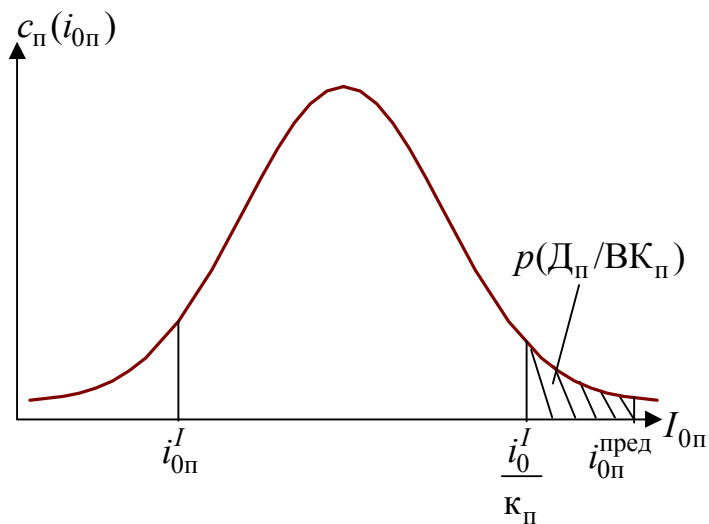
Рисунок 3.5 – Фрагмент электрической сети: символом № обозначен защищаемый объект, буквой «п» – предыдущие элементы (элементы первой периферии), буквами «пп» – предыдущие к предыдущим элементам (элементы второй периферии), цифрами «1» и «2» обозначены комплекты РЗ на концах элементов

Излишние действия, как было отмечено в общих положениях, определяются при внешнем КЗ вдоль пространства предыдущего элемента с использованием ЗРВ токов КЗ нулевой последовательности последнего (плотность распределения вероятностей  $c_n(i_{0n})$  и функция распределения вероятностей  $f_n(i_{0n})$ ). Данный ЗРВ определяется аналогично ЗРВ тока КЗ через рассчитываемый элемент по выражениям (3.5) и (3.6).

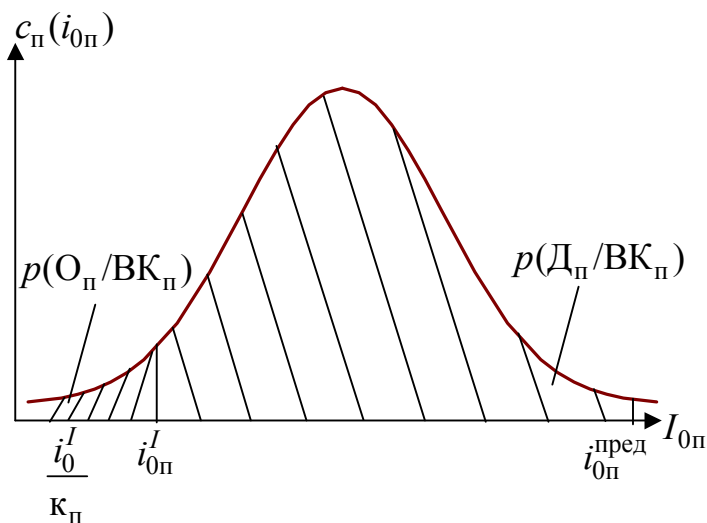
Вероятность излишних действий определяется положением уставки рассматриваемого канала РЗ, приведенной с помощью коэффициента токораспределения  $k_n$  к токам КЗ нулевой последовательности через комплект РЗ предыдущей линии, с которым рассматривается взаимодействие.. Коэффициент распределения при этом определяется в двух режимах: минимальном и максимальном относительно тока через рассчитываемую РЗ. Поэтому соответствующие вероятности вычисляются в двух данных режимах, а

затем усредняются. Для лучшей наглядности на последующих рисунках приводится только один режим.

В соответствии с вышесказанным, рассмотрим формирование излишних действий для каждой ступени. Для первой ступени имеем 2 случая, определяемых соотношением уставок данной ступени и взаимодействующей с ней (рисунок 3.6).



а



б

Рисунок 3.6 – К определению условной вероятности излишних действий первой ступени: а) анализируемая I ступень грубее I ступени РЗ предыдущей линии; б) анализируемая I ступень чувствительнее I ступени РЗ предыдущей линии;  $i_{0π}^I$  – уставка I ступени РЗ предыдущей линии;  $k_π$  – коэффициент токораспределения;  $i_{0π}^{пред}$  – граничное значение тока, превышая которое

осуществляется переход в токи КЗ линии № (максимальное значение тока при КЗ в конце предыдущей линии)

Как иллюстрируется рисунком 3.6, определение области действия предыдущей защиты  $p(D_{\Pi}/BK_{\Pi})$  осуществляется в рамках возможных излишних действий рассматриваемого канала РЗ. Кроме того, необходимо ограничить нормальное распределение тока КЗ вдоль пространства предыдущего элемента величиной  $i_0^{\text{пред}}$  (максимальный ток КЗ в конце предыдущей линии), для того чтобы учесть переход токов по величине на рассчитываемую линию (действия на которой не являются излишними).

Таким образом, условная вероятность излишних действий первой ступени определяется следующим алгоритмом:

в общем виде,

$$p(I_{\Pi}^I / BK_{\Pi}^I) = \frac{1}{2} p(D_{\Pi} / BK_{\Pi}^I) + p(O_{\Pi} / BK_{\Pi}^I), \quad (3.30)$$

$$- \text{ если } \frac{i_0^I}{K_{\Pi}} > i_0^{\text{пред}}, \text{ то } p(D_{\Pi} / BK_{\Pi}^I) = 0, \quad p(O_{\Pi} / BK_{\Pi}^I) = 0;$$

$$- \text{ если } \frac{i_0^I}{K_{\Pi}} > i_{0\Pi}^I, \text{ то } p(D_{\Pi} / BK_{\Pi}^I) = f_{\Pi}(i_{0\Pi}^{\text{пред}}) - f_{\Pi}\left(\frac{i_0^I}{K_{\Pi}}\right), \quad p(O_{\Pi} / BK_{\Pi}^I) = 0$$

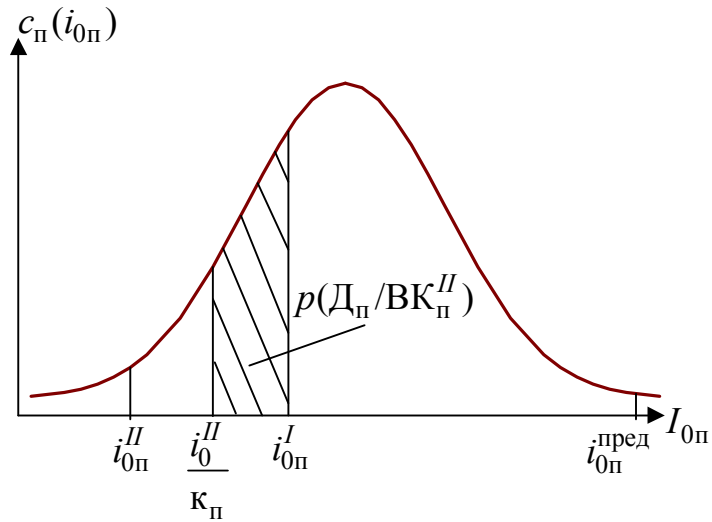
(рисунок 3.6, а);

$$- \text{ если } \frac{i_0^I}{K_{\Pi}} < i_{0\Pi}^I, \text{ то } p(D_{\Pi} / BK_{\Pi}^I) = f_{\Pi}(i_{0\Pi}^{\text{пред}}) - f_{\Pi}(i_{0\Pi}^I),$$

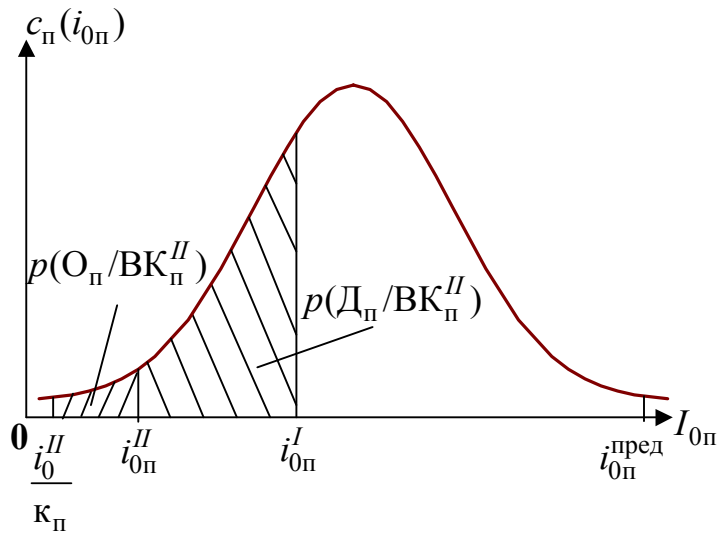
$$p(O_{\Pi} / BK_{\Pi}^I) = f_{\Pi}(i_{0\Pi}^I) - f_{\Pi}\left(\frac{i_0^I}{K_{\Pi}}\right) \text{ (рисунок 3.6, б)}.$$

Отличие при вычислении условной вероятности излишних действий второй ступени заключается в том, что при формировании областей действия и отказа предыдущей РЗ необходимо учитывать работу как одновременной второй ступени предыдущего комплекта РЗ, так и более быстросействующей первой ступени предыдущего комплекта РЗ. При этом если приведенная

уставка рассчитываемой второй ступени оказывается больше уставки первой ступени предыдущего комплекта, излишние действия отсутствуют, т.к. более быстросрабатывающая ступень предыдущего комплекта сработает первой. Поясним сказанное следующим рисунком.



а



б

Рисунок 3.7 – К определению условной вероятности излишних действий второй ступени:  $i_{0п}^{II}$  - уставка II ступени РЗ предыдущей линии

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

$$p(I_{п}^{II} / BK_{п}^{II}) = \frac{1}{2} p(D_{п} / BK_{п}^{II}) + p(O_{п} / BK_{п}^{II}), \quad (3.31)$$

– если  $\frac{i_0^{II}}{K_{п}} > i_{0п}^{пред}$  или  $\frac{i_0^{II}}{K_{п}} > i_{0п}^I$ , то  $p(D_{п} / BK_{п}^{II}) = 0$ ,  $p(O_{п} / BK_{п}^{II}) = 0$ ;

$$- \text{ если } i_{0п}^{II} \leq \frac{i_0^{II}}{K_{п}} < i_{0п}^I, \text{ то } p(D_{п} / BK_{п}^{II}) = f_{п}(i_{0п}^I) - f_{п}\left(\frac{i_0^{II}}{K_{п}}\right), p(O_{п} / BK_{п}^{II}) = 0$$

(рисунок 3.7, а);

$$- \text{ если } \frac{i_0^{II}}{K_{п}} < i_{0п}^{II}, \text{ то } p(D_{п} / BK_{п}^{II}) = f_{п}(i_{0п}^I) - f_{п}(i_{0п}^{II}),$$

$$p(O_{п} / BK_{п}^{II}) = f_{п}(i_{0п}^{II}) - f_{п}\left(\frac{i_0^{II}}{K_{п}}\right) \text{ (рисунок 3.7, б).}$$

Расчет условной вероятности излишних действий третьей ступени осуществляется аналогично второй ступени (отличия от первой ступени и замечания также аналогичны). При этом рассматривается взаимодействие с более быстродействующей второй ступенью и одновременной третьей ступенью предыдущего комплекта РЗ. Алгоритм расчета:

$$p(I_{п}^{III} / BK_{п}^{III}) = \frac{1}{2} p(D_{п} / BK_{п}^{III}) + p(O_{п} / BK_{п}^{III}), \quad (3.32)$$

$$- \text{ если } \frac{i_0^{III}}{K_{п}} > i_0^{\text{пред}} \text{ или } \frac{i_0^{III}}{K_{п}} > i_{0п}^{II}, \text{ то } p(D_{п} / BK_{п}^{III}) = 0, p(O_{п} / BK_{п}^{III}) = 0;$$

$$- \text{ если } i_{0п}^{III} \leq \frac{i_0^{III}}{K_{п}} < i_{0п}^{II}, \text{ то } p(D_{п} / BK_{п}^{III}) = f_{п}(i_{0п}^{II}) - f_{п}\left(\frac{i_0^{III}}{K_{п}}\right), p(O_{п} / BK_{п}^{III}) = 0;$$

$$- \text{ если } \frac{i_0^{III}}{K_{п}} < i_{0п}^{III}, \text{ то } p(D_{п} / BK_{п}^{III}) = f_{п}(i_{0п}^{II}) - f_{п}(i_{0п}^{III}),$$

$$p(O_{п} / BK_{п}^{III}) = f_{п}(i_{0п}^{III}) - f_{п}\left(\frac{i_0^{III}}{K_{п}}\right).$$

Как уже было отмечено, по выражениям (3.39-3.22) и соответствующим алгоритмам вычисляются области действий и отказов предыдущей РЗ в двух режимах: максимальном и минимальном, которые характеризуются коэффициентами токораспределения  $K_{п(а)}$  (нижний индекс «а» здесь и далее означает максимальный по току режим относительно рассчитываемой РЗ) и

$K_{п(и)}$  (нижний индекс «и» здесь и далее означает минимальный по току режим) в данных выражениях. Полученные вероятности затем усредняются, и вычисляется итоговая вероятность  $p(I_{п}^{III} / BK_{п}^{III})$ .

Безусловная вероятность внешнего КЗ для  $j$ -канала СТЗНП определяется выражением

$$p(BK_{п}^j) = \omega^{BK} m(T_{п}^j), \quad (3.33)$$

где  $m(T_{п}^j)$  - математическое ожидание времени действия предыдущей ступени РЗ.

Параметр потока внешнего повреждения  $\omega^{BK}$  определяется для максимального ( $\omega^{BKа}$ ) и минимального ( $\omega^{BKи}$ ) режима по току относительно рассчитываемой РЗ по выражению (3.34) и затем усредняется.

$$\omega^{BK(a,и)} = [p(1)+p(4)] \cdot \omega_{пуд} \cdot \frac{L_{п(a,и)}}{100}, \quad (3.34)$$

где  $\omega_{пуд}$  - параметр поток повреждений предыдущей линии;  $L_{(a,и)}$ , км - область предыдущей линии в максимальном (а) и минимальном (и) режиме, при КЗ вдоль которой способна излишне сработать рассматриваемая ступень РЗ. Данная область вычисляется по выражению (3.35).

$$L_{п(a,и)} = \frac{z_{п(a,и)}}{z_{пуд}} = \frac{лкф(z_{пл}, i_{0пн}, i_{0пс}, i_{0пк}, i_0^j)}{z_{пуд}}, \quad (3.35)$$

где  $z_{пуд}$ , Ом/км – удельное сопротивление прямой последовательности предыдущей линии;  $z_{п}$ , Ом/км – сопротивление предыдущей линии;  $z_{п(a,и)}$ , Ом – сопротивление, захватываемой рассматриваемой ступенью РЗ, вычисляемое с помощью линейно-кусочной аппроксимирующей функцией лкф. Аппроксимация распределения тока КЗ нулевой последовательности в зависимости от места КЗ производится по трем величинам КЗ: в начале ( $i_{0пн(a,и)}$ ), в середине ( $i_{0пс(a,и)}$ ), и

в конце ( $i_{0пк(а,и)}$ ) линии (данные величины также находятся в максимальном и минимальном режиме). Проиллюстрируем сказанное рисунком 3.8.

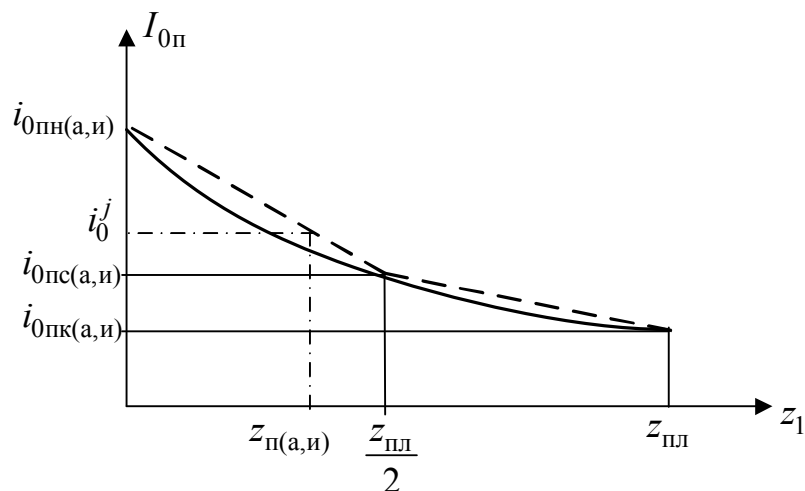


Рисунок 3.8 – К определению сопротивления пространства предыдущей линии  $z_{п(а,и)}$ , при КЗ на котором возможны излишние действия рассматриваемой ступени РЗ

Каждый отрезок линейно-кусочной аппроксимирующей функцией описывается известным уравнением прямой [88]. Разбиение на два отрезка обусловлено режимно-практической целесообразностью, требуемой точностью и удобством расчета. При необходимости, число отрезков может быть увеличено или уменьшено до одного.

### 3.2 Особенности технической эффективности для резервирующей ступени токовой защиты нулевой последовательности

Исходя из назначения четвертой ступени, она должна отвечать требованию резервирования при КЗ на предыдущих элементах. Следовательно, зона правильной работы четвертой ступени охватывает вместе с рассчитываемой линией первую периферию, а излишними действиями являются срабатывания в зоне второй периферии. По этим причинам в расчете технической эффективности четвертой ступени имеются особенности.

Для удобства последующего изложения материала, приведем здесь исходное выражение технического эффекта:

$$E = p(KЗ) - p(O) - p(\Gamma) - p(\Gamma^{ap}) - p(\Gamma^{нпф}) - p(\Gamma^{нам}) - p(I). \quad (3.36)$$

В соответствии с вышеизложенным, для четвертой ступени необходимо уточнить расчет вероятностей  $p(A)$ ,  $p(O)$ ,  $p(I)$ .

В данном выражении  $p(A)$  есть потенциальный эффект, равный вероятности обнаружения КЗ. Для четвертой ступени, в соответствии с общими положениями критерия, потенциальный эффект равен:

$$p(KЗ^{IV}) = p(KЗ_{№}^{IV}) + \sum_{\Pi} p(KЗ_{\Pi}^{IV}), \quad (3.37)$$

где  $p(KЗ_{№}^{IV})$  и  $p(KЗ_{\Pi}^{IV})$  – вероятности обнаружения КЗ на защищаемом элементе (№) и на элементе первой периферии (п). Данные вероятности вычисляются по выражениям (3.2) и (3.3).

Вероятность отказа четвертой ступени определяется, как

$$p(O^{IV}) = p(O_{№}^{IV}) + \sum_{\Pi} p(O_{\Pi}^{IV} / KЗ_{\Pi}^{IV}) p(KЗ_{\Pi}^{IV}), \quad (3.38)$$

где  $p(O_{№}^{IV})$  – вероятность отказа ступени при КЗ на защищаемом элементе №, рассчитывается аналогично (3.4);  $p(O_{\Pi}^{IV} / KЗ_{\Pi}^{IV})$  – условная вероятность отказа ступени при КЗ на предыдущих элементах.

Для расчета  $p(O_{\Pi}^{IV} / KЗ_{\Pi}^{IV})$ , как и при расчете излишних действий, необходимо привести уставку рассматриваемой ступени в координаты предыдущей РЗ и использовать соответствующий ЗРВ токов КЗ нулевой последовательности (рисунок 3.9).

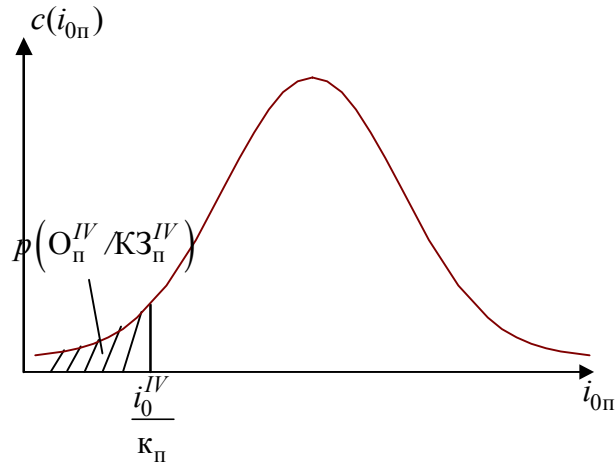


Рисунок 3.9 – Определение условной вероятности отказа резервирующей ступени при КЗ на предыдущей линии  $p(O_{п}^{IV}/KЗ_{п}^{IV})$

Исходя из рисунка 3.9, искомая условная вероятность равна

$$p(O_{п}^{IV}/KЗ_{п}^{IV}) = f\left(\frac{i_0^{IV}}{K_{п}}\right) = 0,5 + \Phi\left[\frac{\frac{i_0^{IV}}{K_{п}} - m(I_{0п})}{\sigma(I_{0п})}\right]. \quad (3.39)$$

Для вывода выражений излишних действий резервирующей ступени вновь обратимся к рисунку 3.5. Как уже было отмечено, излишними действиями резервирующей ступени являются действия при КЗ на элементах второй периферии (пп). Дополнительно излишние действия возможны при КЗ на первой периферии (п) в том случае, если рассматриваемая резервирующая ступень чувствительна к ним (определяется величиной токовой уставки) и контролируемая резервирующая ступень имеет пространство отказов (из-за неправильно выбранной токовой уставки), или если временная уставка рассматриваемой резервирующей ступени меньше или равна временной уставке контролируемой резервирующей ступени элемента первой периферии. Хотя последние случаи противоречат встречно-ступенчатому принципу выбора выдержки времени и руководящим указаниям [7], указанные варианты необходимо учитывать для решения задачи выбора оптимальной настройки резервирующей ступени в сложных и кольцевых сетях. Сказанное определяет выражение для расчета вероятности излишних действий (3.40):

$$p(I^{IV}) = \sum_{\Pi} p(I_{\Pi}/BK_{\Pi})p(BK_{\Pi}) + \sum_{\Pi} \sum_{\Pi\Pi} p(I_{\Pi\Pi}/BK_{\Pi\Pi})p(BK_{\Pi\Pi}), \quad (3.40)$$

где первая часть выражения представляет собой вероятность излишних действий при КЗ на линиях первой периферии (принимается равной нулю, если временная уставка резервирующей ступени выбрана в соответствии со встречно-ступенчатым принципом и контролируемая резервирующая ступень не имеет отказов при КЗ в области защищаемой линии), вторая часть выражения – вероятность излишних действий при КЗ на элементах второй периферии (« $\Pi_{\Pi\Pi}$ » - индекс соответствующей линии второй периферии в соответствии с рисунком 3.5).

В соответствии с вышеизложенным, излишние действия резервирующей ступени целесообразно рассчитывать по следующему алгоритму.

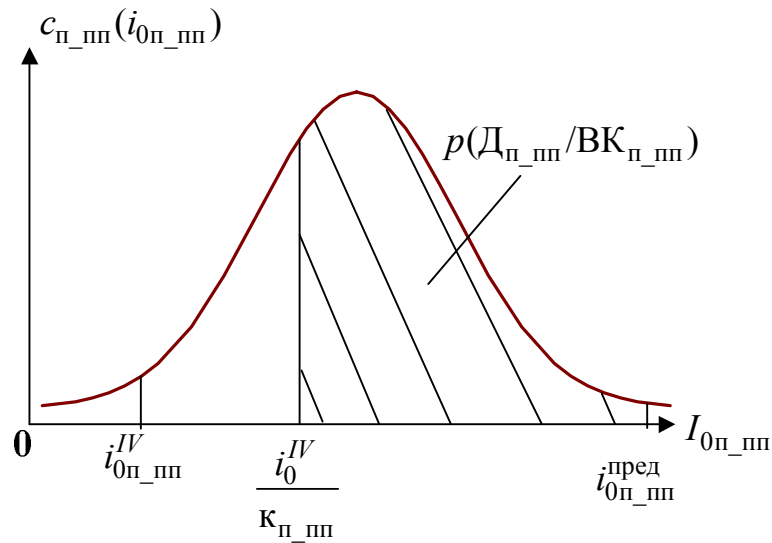
1. Рассчитываются условные вероятности отказа  $p(O_{\Pi\Pi}/BK_{\Pi\Pi})$  и действия  $p(D_{\Pi\Pi}/BK_{\Pi\Pi})$  резервирующих ступеней предыдущих элементов первой и второй периферии. При этом возможны два случая, определяемые соотношением уставки рассматриваемой резервирующей ступени  $i_0^{IV}$  и ступени предыдущего элемента первой периферии  $i_{0\Pi}^{IV}$  или второй  $i_{0\Pi\Pi}^{IV}$ . Рассмотрим для примера взаимодействие с резервирующей ступенью второй периферии (для первой все аналогично) (рисунок 3.10).

2. Анализируются временные уставки, в соответствии с которыми определяется условная вероятность излишних действий:

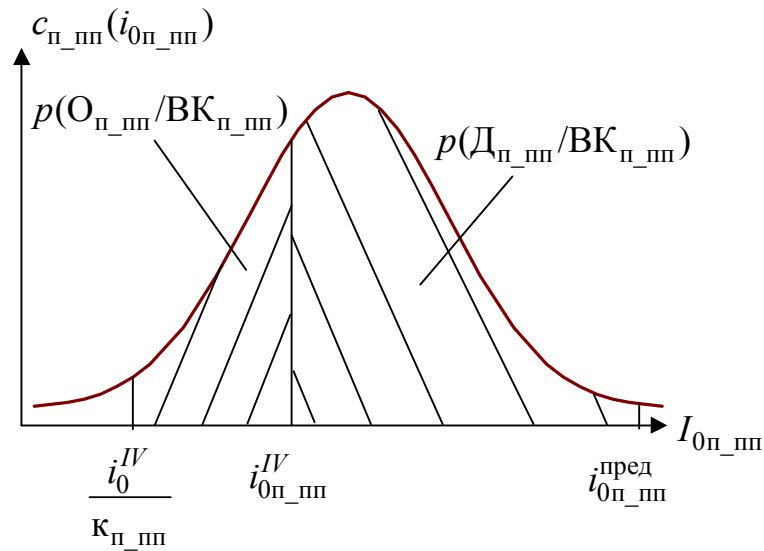
- если  $t^{IV} < t_{\Pi\Pi}^{IV}$ , то  $p(I_{\Pi\Pi}/BK_{\Pi\Pi}) = p(O_{\Pi\Pi}^{IV}/BK_{\Pi\Pi}) + p(D_{\Pi\Pi}^{IV}/BK_{\Pi\Pi})$ ;
- если  $t^{IV} = t_{\Pi\Pi}^{IV}$ , то  $p(I_{\Pi\Pi}/BK_{\Pi\Pi}) = p(O_{\Pi\Pi}^{IV}/BK_{\Pi\Pi}) + \frac{1}{2}p(D_{\Pi\Pi}^{IV}/BK_{\Pi\Pi})$ ;
- если  $t^{IV} > t_{\Pi\Pi}^{IV}$ , то  $p(I_{\Pi\Pi}/BK_{\Pi\Pi}) = p(O_{\Pi\Pi}^{IV}/BK_{\Pi\Pi})$ .

Аналогично рассмотренным излишним действиям основных ступеней, данный алгоритм применяется к двум режимам по току относительно

рассматриваемой РЗ: максимальному и минимальному. Полученные значения вероятностей затем усредняются.



а



б

Рисунок 3.10: а – рассматриваемая резервирующая ступень грубее контролируемой резервирующей ступени предыдущего элемента. В данном случае контролируемая ступень отказов не имеет (в рамках рассматриваемой); б – рассматриваемая резервирующая ступень чувствительнее контролируемой резервирующей ступени предыдущего элемента;

$c_{п\_пп}(i_{0п\_пп})$  – плотность распределения вероятностей токов нулевой последовательности через защиту предыдущего элемента п-пп при КЗ на нем;  $i_{0п\_пп}^{пред}$  - токовая граница, характеризующая переход на последующий элемент (максимальный ток через защиту элемента п-пп)

Резервирующая ступень в соответствии со своим назначением должна быть чувствительной к КЗ на элементах первой периферии. С другой стороны, такие срабатывания являются нежелательными, если они происходят раньше действия резервирующей ступени предыдущего элемента. Поэтому, как уже было отмечено выше, если временная уставка рассматриваемой резервирующей ступени меньше или равна временной уставке резервирующей ступени элемента первой периферии, необходим учет вероятности соответствующих излишних действий. В этом случае, также может быть использован изложенный выше алгоритм. Однако при этом необходимо учесть следующую особенность.

Вероятность отказа срабатывания рассматриваемой резервирующей ступени  $p(O_{\Pi}^{IV} / KZ_{\Pi})$  также определяется при КЗ на элементах первой периферии. Соответственно, для определения вероятности отказа срабатывания и вероятности излишних действий используется одна характеристика плотности распределения вероятностей тока КЗ. В связи с этим, при времени рассматриваемой резервирующей ступени меньшем времени резервирующей ступени элемента первой периферии возникает ситуация невозможности оптимизации уставки по критерию отказа и излишних действий. Данная ситуация иллюстрируется рисунком 3.11.

Из рисунка 3.11 видно, что сумма потерь  $p(O_{\Pi}^{IV} / KZ_{\Pi}) + p(I_{\Pi}^{IV} / BK_{\Pi})$  постоянна (равна единице, если не учитывать границу  $i_{0\Pi}^{\text{пред}}$ ) при любой уставке анализируемой резервирующей ступени  $i_0^{IV}$  в рассматриваемом случае, когда временная уставка данной ступени меньше временной уставки резервирующей ступени предыдущего элемента. По этой причине оптимизация возможна только при установлении коэффициента «важности» ( $\kappa_{\text{в}}$ ). Если для нас важнее, чтобы отказов резервирующей ступени при КЗ на первой периферии было меньше, чем излишних действий, то при вычислении оптимальной уставки в выражение технической эффективности необходимо добавить

соответствующий коэффициент меньше единицы (его определение возможно экспертным или экономическим путем [89]):  $\kappa_{\text{в}} \cdot p(I_{\text{п}}^{IV} / BK_{\text{п}})$ , где  $\kappa_{\text{в}} < 1$ .

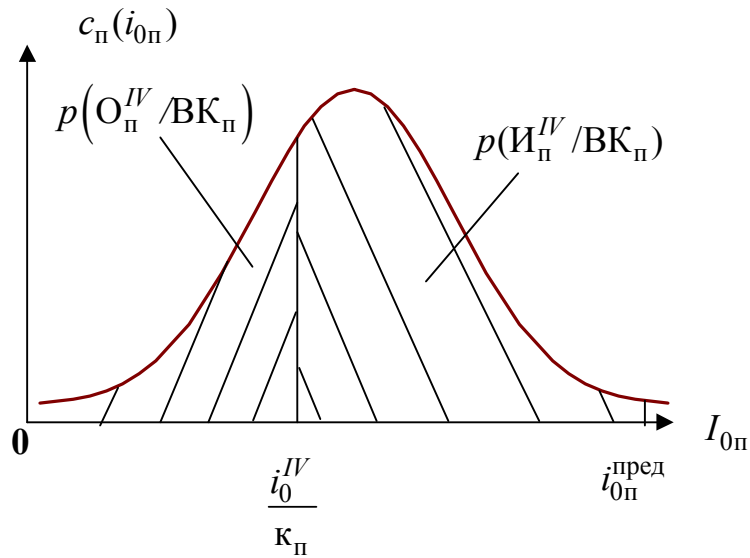


Рисунок 3.11 – Определение условной вероятности отказа  $p(O_{\text{п}}^{IV} / KЗ_{\text{п}})$  и излишних действий  $p(I_{\text{п}}^{IV} / BK_{\text{п}})$  резервирующей ступени при КЗ на первой периферии

Безусловная вероятность эксплуатационного режима для резервирующей ступени  $p(\Xi)$  определяется в соответствии с (2.16), при этом за безусловную вероятность потенциального эффекта  $p(KЗ)$  необходимо принимать сумму вероятностей КЗ на автоматизируемой линии и линиях первой периферии, а за безусловную вероятность внешнего короткого замыкания  $p(BK)$  – сумму соответствующих безусловных вероятностей внешних коротких замыканий на линиях первой и второй периферии.

### 3.3 Особенности технической эффективности для токовых релейных защит, реагирующих на фазные величины

Релейные защиты, реагирующие на фазные величины, преимущественно используются в сетях 110 кВ и ниже. Это связано с тем, что на более высоких напряжениях величина тока КЗ соизмерима с рабочими токами в максимальном

режиме. Вследствие этого, возникают существенные сложности по удовлетворению требованиям селективности и чувствительности.

Расчет технической эффективности для данных защит по сравнению с рассмотренной токовой защитой нулевой последовательности несколько упрощается, поскольку нет необходимости учитывать ложные действия в неполнофазном режиме, т.к. последний не свойственен сетям рассматриваемого напряжения (в связи с отсутствием выключателей с пофазными приводами). Расчет остальных составляющих технической эффективности (3.1) аналогичен. Понятно, что при расчете условных вероятностей необходимо использовать закон распределения вероятностей фазных токов.

#### **3.4 Режимно-коммутационный анализ технической эффективности токовой ступенчатой релейной защиты линии в сетевом районе высоковольтных линий**

Разработанное математическое описание технической эффективности, включающее в себя расчетные выражения и алгоритмы, позволяет произвести режимно-коммутационный анализ технической эффективности токовой ступенчатой релейной защиты линии в сетевом районе высоковольтных линий. Данный анализ (рисунок 3.12) показывает зависимость технической эффективности каналов РЗ от выбранных временных и токовых уставок и от их соотношения с соответствующими уставками каналов РЗ предыдущих линий. Пространство защищаемой и предыдущих линий на рисунке 3.12 отображено в виде сопротивления прямой последовательности.



прямых: 1) буквой  $i$  – токи с нижними индексами:  $c$  – для согласования,  $a$  – максимальные,  $и$  – минимальные через защиты №1, п1, обусловленные режимно-коммутационными состояниями сети; 2) буквой  $i$  – уставки по току с нижними индексами: №1, п1 и верхними индексами: I, II, III, IV соответствующих ступеней; 3) буквой  $t$  – уставки по времени с такими же нижними индексами: №1, п1 и верхними индексами: I, II, III, IV ступеней; 4) двумя буквами  $zi$  с теми же нижними индексами №1, п1 и верхними индексами: I, II, III, IV ступеней – отображения уставок по току в координатах сопротивления прямой последовательности  $z_1$  линий. Входящие в верхние индексы уставок буква  $c$  свидетельствует о процедуре их выбора по условию согласования или селективности, буква  $ч$  – о выборе их по чувствительности; буква  $н$  обозначает характерные для короткой предыдущей линии  $п$  случаи, когда уставка второй ступени защиты №1 является более чувствительной, чем первая ступень защиты п1; 5)  $c_{№1}(i)$  – нормальная плотность распределения вероятностей токов при КЗ на линии №1. На оси абсцисс  $z_1$  представлено направление возрастания тока КЗ  $i$ , противоположное возрастанию сопротивления  $z_1$ .

Кривые в зоне линии № представляют собой распределение тока КЗ в максимальном (индекс «а») и минимальном режиме (индекс «и») для комплекта РЗ 1. Этим кривым соответствуют две кривые в зоне линии п и две кривые в зоне линии пп, которые являются продолжением первых, т.к. найдены в тех же максимальном и минимальном режимах относительно защиты №1.

III – Изменение технической эффективности I, II, III, IV ступеней токовой защиты  $E_*$ , отображенных в верхнем индексе.

Сплошными линиями на рисунке 3.12 показаны кривые и прямые для ординарных случаев настройки ступеней защит, точками, пунктиром – для случая переноса уставок ординарной настройки второй ступени защиты №1 на короткие предыдущие линии. В сети показаны только линии. Трансформаторы

и автотрансформаторы исключены, как принципиально не влияющие на рассматриваемые способы настройки.

Требование ЭРМ обеспечить селективность ступенчатых токовых защит обуславливает наличие отказов первой быстродействующей ступени при КЗ в области противоположного конца линии (такие отказы можно назвать отказами быстродействующего срабатывания), с которыми приходится мириться, чтобы не допустить излишние действия первой ступени при КЗ в начале внешних (предыдущих в направлении действия РЗ) элементах. В целом ЭРМ обеспечивает проектирование РЗ с преимущественным исключением излишних действий. Область быстродействующих отказов перекрывается более чувствительной, но медленнодействующей второй ступенью. При наличии предыдущих коротких линий или мощных трансформаторов (автотрансформаторов) вторые (третьи) ступени могут оказаться нечувствительными. ЭРМ в этом случае предлагает исключить из рассмотрения согласования с РЗ предыдущих коротких линий путем установки на последних защит с обменом информацией между комплектами аппаратуры по концам линий. С точки зрения технической эффективности, наличие обменного канала для первых ступеней линий позволяет изменить уставки до величин, обеспечивающих гарантированную чувствительность при КЗ на всем пространстве линий и тем самым исключить потери быстродействующего срабатывания. Этот вариант РЗ целесообразно в дальнейшем назвать наилучшим, но дорогим из-за необходимости канала обмена. В связи с этим целесообразно рассмотреть другие менее дорогие варианты построения и настройки РЗ линии без канала обмена, но по свойствам, приближающимся в некоторой степени к наилучшему. Рассмотрение таких менее совершенных вариантов вполне возможно благодаря разработанному аппарату технической эффективности РЗ, позволяющему количественно оценивать качество канала РЗ.

Первый вариант – это намеренное первоначальное выставление величины уставки второй ступени исходя из чувствительности, с последующей проверкой уровня технической эффективности. Первая ступень при этом настраивается как обычно по ЭРМ. При такой настройке второй ступени возможны участки токов и соответствующих сопротивлений прямой последовательности предыдущих линий, при КЗ на пространстве которых возможны одновременные действия вторых ступеней защищаемой и предыдущих линий. Названные одновременные участки обуславливают потери излишних действий второй ступени защищаемой линии (которые являются причиной спада в правой части кривых  $E_{*N_{el}}^{IIH}$  на рисунке 3.12). Эти потери добавляются к потерям ложных действий данной ступени. Отказов срабатывания у вторых ступеней, настроенных по чувствительности, нет. Потенциально возможным эффектом, как и для канала первой ступени, является вероятность КЗ на защищаемой линии.

Таким образом, преимуществом настройки второй ступени исходя из чувствительности является устранение многочисленных расчетов по отстройкам и согласованиям, особенно при большом количестве предыдущих элементов в сложно-замкнутой сети, переводя эти расчеты из многочисленных и обязательных в менее многочисленные и желательные вероятности потерь излишних действий. Уточнение уставки данной ступени в сторону закругления с точки зрения требований ЭРМ невозможно, а в сторону чувствительности увеличивает участки одновременности вторых ступеней защищаемой и предыдущих линий и, следовательно, потери излишних действий второй ступени защищаемой линии. Анализ показывает, что при выборе уставок вторых ступеней исходя из чувствительности участки одновременности формируются на коротких предыдущих линиях, если на них предусмотрены ступенчатые РЗ. На соизмеримых по длине с защищаемой предыдущих линиях участки одновременности маловероятны.

На основании изложенного, первый вариант настройки ступенчатых РЗ без канала обмена и уставкой второй ступени по чувствительности по сравнению с наилучшим вариантом наряду с потерями ложных действий имеет потери быстродействующего срабатывания первой ступени и потери излишних действий второй ступени на коротких предыдущих линиях с установленными ступенчатыми защитами, но сохраняются преимущества устранения многочисленных расчетов, согласований и отстроек вторых ступеней при отсутствии канала обмена. Однако объективное решение по уставке может быть получено путем минимизации вероятности излишних действий второй ступени.

Второй вариант построения и настройки ступенчатых РЗ без канала обмена определяется выставлением уставки второй ступени исходя из чувствительности, а первой ступени путем оптимизации технической эффективности. При этом экспертным или экономическим путем должно быть задано соотношение удельных весов между излишними и ложными действиями, с одной стороны, и отказами срабатывания, с другой. В данном варианте, как и в наилучшем, вторые ступени практически не будут иметь случаев отказов срабатывания и излишних действий, а первые ступени отказов быстродействующего срабатывания.

Уставки резервирующих (четвертых) ступеней по току согласно ЭРМ определяются независимо путем отстройки от рабочих токов, а время действия этих ступеней по встречно-ступенчатому принципу, который в случае усложненной с многократным питанием сети не позволяет однозначно выбрать уставки по времени. Поэтому возникают участки одновременных действий резервных ступеней на пространстве предыдущих к предыдущим линиях или линиях второй периферии и, как следствие, излишние действия. Уставки этих ступеней по параметру реагирования могут быть уточнены путем минимизации излишних действий, если уставка резервирующей ступени защищаемой линии размещается на пространстве всех линий второй периферии. В противном

случае, когда уставка резервирующей ступени защищаемой линии попадает на пространство предыдущих линий, т.е. имеют место отказы интересующей ступени в области резервирования, названное уточнение необходимо производить с помощью полного критерия технической эффективности.

### **3.5 Методика выбора уставок токовых ступенчатых защит**

На основании проведенного анализа формируется методика выбора уставок, представленная ниже в виде вариантов настройки. Выбор конкретного варианта обусловлен техническими возможностями его реализации и экономическими соображениями.

#### **3.5.1 Варианты настройки основных ступеней**

Вариант 1. На коротких предыдущих линиях (коротких линиях первой периферии) устанавливается РЗ с обменом информацией между комплектами на концах этих линий (РЗ с абсолютной селективностью) [82]. Тогда благодаря гарантированному быстродействию таких РЗ, независимости их настройки и действия, уставки вторых ступеней защищаемых линий могут не согласовываться с быстродействующими РЗ предыдущих линий, а выбраны исходя из условия чувствительности при КЗ на конце (концах) защищаемой линии. Аналогично нет необходимости вторую ступень отстраивать от КЗ за мощными трансформаторами и автотрансформаторами, если наряду с самими трансформаторами и автотрансформаторами ошиновки противоположных сторон последних оборудованы быстродействующей дифференциальной защитой. Это позволяет иметь большую чувствительность второй ступени. При этом необходимо определить излишние действия второй ступени защищаемой линии, одновременной с вторыми ступенями предыдущих линий, которых отсутствует быстродействующая РЗ, защищающая весь объект. Объем этих излишних действий может складываться в первую очередь при КЗ в зонах пространства предыдущих электрически более коротких линий. На длинных линиях их, как правило, не будет.

Вариант 2. На всех линиях сети установлены РЗ с абсолютной селективностью [82]. Вторые ступени при этом являются резервирующими для РЗ с абсолютной селективностью. Уставки таких ступеней однозначно и логично выбираются исходя из чувствительности или максимума технической эффективности. Согласований и отстроек для их настройки не требуется, т.к. нет потерь, связанных с КЗ – отказов срабатывания и излишних действий.

Вариант 3. Вторые ступени выбираются по чувствительности, а первые - по существующему ЭРМ. Возникают потери отказов быстродействующего срабатывания первых ступеней, а для вторых ступеней дополнительные потери излишних действий при взаимодействии со вторыми ступенями предыдущих линий, как правило, коротких линий. Для их уменьшения, уставка второй ступени оптимизируется по критерию минимума вероятности излишних действий.

Вариант 4. Вторые ступени выбираются по чувствительности, а первые по максимуму технической эффективности. Имеют место остаточные потери быстродействующего срабатывания первой ступени, а у вторых ступеней дополнительные потери излишних действий при взаимодействии со вторыми ступенями предыдущих линий, как правило, коротких линий.

### **3.5.2 Настройка резервирующей ступени**

Для резервирующих ступеней, уставки которых по параметру реагирования выбираются независимо путем отстройки от рабочих режимов или исходя из чувствительности при КЗ в зоне резервирования, задача выбора уставки по времени не может быть однозначно решена при наличии обходных связей. Существующий встречно-ступенчатый принцип формирования уставок по времени позволяет получить нарастающие времена действия резервирующих ступеней сетей каждой структурно-радиальной последовательности сети в направлении от потребителя к источнику, с максимальной выдержкой времени у источника. При наличии обходных связей относительно защищаемых силовых компонентов каждой радиальной

структуры сети возникает стереотип зависания в составе контура сети с обходной связью и соответственно вечного возрастания выдержек времени на защищаемых компонентах при обходе компонентов этого контура. Это обуславливает необходимость экспертного вмешательства для остановки данного непрерывного процесса возрастания уставки. Однако правомерность такого решения необъективна, т.к. неизвестно, на каком этапе остановлен процесс и насколько полученные временные уставки целесообразны. Данный вопрос предлагается решить с помощью минимума объема излишних действий интересующей резервирующей ступени при каждом варианте временных уставок в условиях взаимодействия резервирующих ступеней структурно-радиальной последовательности в направлении от потребителя к источнику.

Чтобы правильно и однозначно учесть излишние действия рассматриваемой резервирующей ступени РЗ защищаемой линии, должны быть выявлены участки ее взаимодействия в направлении действия с резервирующими ступенями периферийных линий сети. Алгоритмы выявления участков осуществляются путем контроля отказов срабатывания и действий РЗ предыдущих линий или линий первой периферии, а также линий более дальних периферий сети отдельно для случаев: превосходства чувствительности рассматриваемой резервирующей ступени над контролируемыми резервирующими ступенями предыдущих и более дальних линий и обратного превосходства чувствительности контролируемых резервирующих ступеней над рассматриваемой ступенью. Время действия рассматриваемой ступени при этом может быть большим, меньшим, равным времени действия контролируемых ступеней. Отмеченные обстоятельства выбора уставок резервирующей ступени соответствуют алгоритму, реализованному в разделе 3.2.

Таким образом, выбор временной уставки резервирующей ступени можно осуществить как на основе критерия технической эффективности, так и на основе его составляющей - минимума вероятности излишних действий.

Принимается величина временной уставки, соответствующая максимуму технической эффективности или минимальной вероятности излишних действий.

### **3.6 Выводы по главе**

1. В соответствии с общими положениями критерия технической эффективности разработано математическое описание для расчета технической эффективности каналов токовой защиты нулевой последовательности. Данное математическое описание основано на существующих вероятностно-статистических методах и разработанных вероятностно-статистических формул и алгоритмов, позволяющих учесть все составляющие функционально-метрологических потерь. Полученные результаты обобщены на токовые защиты, реагирующие на фазные токи.

2. Из разработанного математического описания технической эффективности анализа функционирования токовых ступенчатых защит следует, что предлагаемый критерий технической эффективности позволяет как оценить существующую настройку каналов РЗ (в диапазоне от отрицательных значений до 1 о.е. или 100 %), так и может являться критерием выбора оптимальной уставки ступени, соответствующей максимальному значению технической эффективности. При этом в качестве критерия поиска наилучшей уставки может являться 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, как правило, симметричный характер (поэтому влияют только на дисперсию используемых ЗРВ, а математическое ожидание от них не зависит).

3. На основании этого, а также проведенного режимно-коммутационного анализа сети, разработана методика настройки РЗ, включающая в себя 4

варианта настройки основных ступеней и вариант настройки резервирующей ступени, который позволяет обосновать выбор временной уставки резервирующей ступени в замкнутых сетях с обходными связями и при длинных структурно-радиальных последовательностях.

4. Для практического использования критерия технической эффективности и методики настройки, в виду сложности соответствующих математических расчетов (для расчетов вручную или компьютерными математическими пакетами), необходима специализированная компьютерная программа.

## **ГЛАВА 4. КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА РАСЧЕТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТУПЕНЧАТЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ**

### **4.1 Обоснование реализации**

Разработанное математическое обеспечение для расчета технической эффективности токовых РЗ, в силу его существенной сложности и специфики, приобретает практический смысл только при его реализации в виде автоматизированного средства расчета. Наиболее целесообразной реализацией данного средства является компьютерная программа.

Программа может быть реализована в двух вариантах: полностью автоматизированном или интерактивном. Первый вариант предполагает автономный инструмент, второй – активное участие пользователя в процессе анализа технической эффективности РЗ, выбора уставок комплектов РЗ для проектируемого района. Проанализируем оба варианта и остановимся на одном из них.

#### **1. Полностью автоматизированное средство расчета.**

В этом случае предполагается разработка программы, которая требует минимального участия проектировщика в достижении оптимальных настроек всех релейных защит для заданного района. Проектировщик взаимодействует с программой только на начальном этапе при установке схемных и режимных параметров рассчитываемой сети.

Соответственно, для выбора наилучших уставок исходя из максимума технической эффективности, автономная программа дополнительно к решаемым в диссертации задачам должна:

а) определять значения параметров максимальных и минимальных режимов, содержать алгоритмы анализа топологии сети, учитывая при этом вероятность состояния каждого режима;

б) для определения квантилей электрических величин содержать модули расчета установившихся режимов, симметричных и несимметричных коротких замыканий.

Первое требование в настоящий момент реализуется проектировщиком самостоятельно, исходя из логики решаемой задачи и экспертно-руководящих рекомендаций. Второе требование – с помощью цифровых вычислительно-расчетных комплексов, таких как ТКЗ 3000, АРМ СРЗА для расчета электрических величин коротких замыканий, Мустанг, Евростаг, Дакар, Растр для расчета установившихся режимов, а также программно-технических средств моделирования ЭЭС: RTDS, Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) и др.

Разработка такого рода полностью автоматизированной компьютерной программы, не требующей участия проектировщика и сторонних программ расчета электрических величин, теоретически возможна, но требует большого объема ресурсов.

## 2. Интерактивная программа.

Данный вариант реализуется согласно структуре рисунка 4.1, на котором аббревиатурой RPTEC обозначена разработанная программа Relay Protection Technical Efficiency Calculation (Расчет технической эффективности релейной защиты) [90, 91].

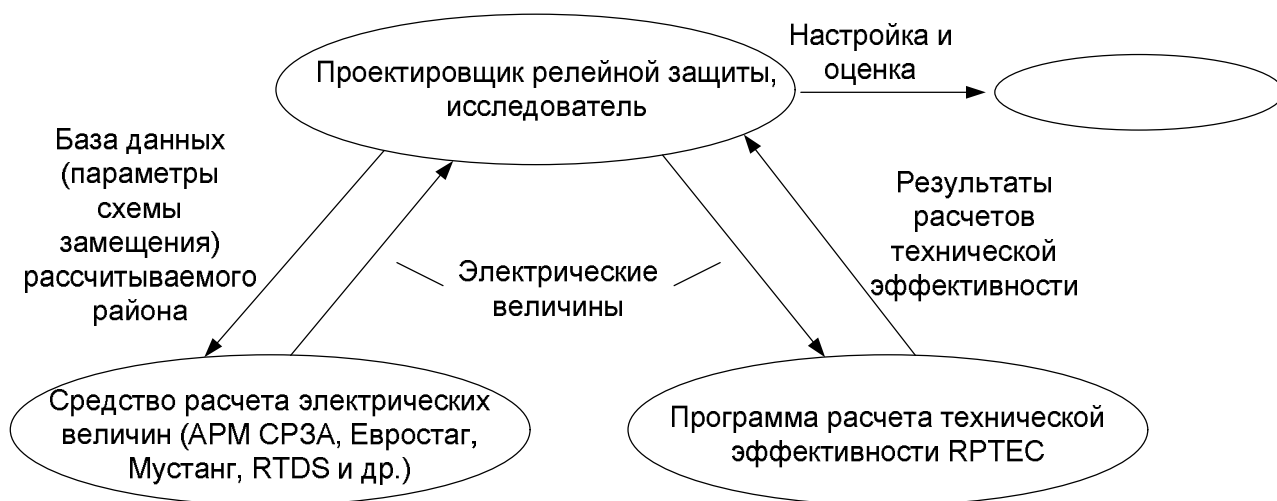


Рисунок 4.1 – Структура взаимодействия

В этом случае, проектировщик использует сторонние продукты для расчета электрических величин, которые затем используются в качестве исходных данных для вероятностных расчетов в программе RPTEC. Последняя помимо этого для реализации разработанных алгоритмов определения технической эффективности использует дополнительную (в основном – статистическую) информацию, которая не дублирует исходные данные сторонних программ (таким образом, исключая возможные ошибки, связанные с рутинной работой по отслеживанию изменений и согласованию баз данных для различных программ).

В целом, исходные данные необходимые для реализации разработанных вероятностно-статистических алгоритмов определения технической эффективности в программе RPTEC приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные

| Параметр                                                                        | Комментарий                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Источник                                |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| $i_{0p1}, i_{0p2};$<br>$i_{0np1}, i_{0np2};$<br>$i_{0п\_пп1},$<br>$i_{0п\_пп2}$ | Квантили порядков $p1 = 0,9987$ и $p2 = 0,0013$ тока нулевой последовательности:<br>- через рассчитываемую защиту при КЗ на автоматизируемой линии;<br>- через защиту предыдущего элемента $п^*$ при КЗ на данном элементе;<br>- через защиту предыдущего к предыдущему элементу $пп^*$ при КЗ на нем. | Средство расчета электрических величин. |
| $i_{p1}^{ap}, i_{p2}^{ap}$                                                      | Квантили порядков $p1$ и $p2$ тока асинхронного режима через рассчитываемую защиту.                                                                                                                                                                                                                    |                                         |
| $i_{0p1}^{нпф}, i_{0p2}^{нпф}$                                                  | Квантили порядков $p1$ и $p2$ тока нулевой последовательности неполнофазного режима на защищаемой линии через рассчитываемую защиту, при токе АР в разрыве для квантиля порядка $p2$ и минимальном токе рабочего режима для квантиля $p1$ .                                                            |                                         |
| $i_{p1}^3, i_{p2}^3$                                                            | Квантили порядков $p1$ и $p2$ тока эксплуатационного режима через рассчитываемую защиту при токе АР в разрыве для квантиля порядка $p2$ и токе рабочего режима для квантиля $p1$ .                                                                                                                     |                                         |
| $z, z_{п}, z_{п\_пп}$                                                           | Сопротивление автоматизируемой линии №, предыдущего элемента $п$ и предыдущего к предыдущему элемента $пп$ соответственно.                                                                                                                                                                             | Эксплуатационная величина.              |

Продолжение таблицы 4.1

| Параметр                                      | Комментарий                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Источник                                 |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| $z_{уд}, z_{пуд}, z_{п\_ппуд}$                | Удельное сопротивление автоматизируемой линии №, предыдущего элемента п и предыдущего к предыдущему элементу пп соответственно.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Справочная величина, например [92]       |
| $\omega_{уд}, \omega_{пуд}, \omega_{п\_ппуд}$ | Удельный параметр потока повреждения автоматизируемой линии №, предыдущего элемента п и предыдущего к предыдущему элементу пп соответственно.<br>Определяется в зависимости от напряжения и типа опор.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Статистическая величина. Например, [73]. |
| $m(T^j), m_{п}(T^e), m_{п\_пп}(T^q)$          | Математическое ожидание времени действия рассчитываемой ступени $j$ линии № и взаимодействующих с ней ступеней $e, q$ РЗ предыдущих элементов п и предыдущих к предыдущим элементам пп соответственно.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Экспертно-руководящий метод настройки.   |
| $m(T^{нпф})$                                  | Математическое ожидание времени существования неполнофазного режима на защищаемой линии. Определяется в зависимости от времени действия используемой автоматики однофазного повторного включения и типа выключателя: от 0,55 до 1 с.                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Эксплуатационная величина.               |
| $m(T^{ар})$                                   | Математическое ожидание времени существования асинхронного режима. Определяется в зависимости от вида автоматики ликвидации асинхронного режима:<br>1) Быстродействующий, не допускает достижения расхождения угла ЭДС до 180 градусов. Время работы – 0,1 с.<br>2) Действует на первом цикле качаний. Время работы – 0,55-0,8 с.<br>3) Действует после нескольких циклов качаний. Время работы – до 20 с.<br>Если вид АЛАР неизвестен, принимается скоординированная с временем действия второй ступени величина – 0,55-0,8 с. | Эксплуатационная величина.               |

| Параметр                                                                                                                         | Комментарий                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Источник                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $i_{0па}^{пред}$ , $i_{0пи}^{пред}$ ,<br>$i_{0п_ппа}^{пред}$ ,<br>$i_{0п_ппи}^{пред}$                                            | Токовые границы, характеризующие переход с пространства токов предыдущей линии на автоматизируемую линию в координатах токов предыдущего комплекта РЗ для максимального (а) и минимального (и) режима относительно рассчитываемой РЗ. Необходимы для корректного определения зоны захвата предыдущего элемента. Определяется как усредненная величина видов КЗ, на которые реагирует РЗ, с учетом удельных весов последних. | Средство расчета электрических величин.<br>Например, при использовании АРМ СРЗА или ТКЗ 3000 данные величины для одного режима оптимально вычислять совместно в одном расчетном модуле. |
| $K_{ап}$ , $K_{ип}$ ,<br>$K_{ап_пп}$ , $K_{ип_пп}$                                                                               | Коэффициенты токораспределения в максимальном (а) и минимальном (и) режиме для рассчитываемой РЗ при КЗ на предыдущем и предыдущем к предыдущему элементам соответственно.                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                         |
| $i_{0пна}$ , $i_{0пка}$ ,<br>$i_{0пни}$ , $i_{0пки}$ ,<br>$i_{0п_ппна}$ ,<br>$i_{0п_ппка}$ ,<br>$i_{0п_ппни}$ ,<br>$i_{0п_ппки}$ | Величины токов КЗ в максимальном (а) режиме и минимальном (и) режиме для рассчитываемой РЗ при КЗ в начале предыдущего элемента (н) и в конце (к). Необходимы для аппроксимации распределения токов КЗ вдоль элементов первой (п) и второй (п_пп) периферии.                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                         |
| $i_{0п}^e, i_{0п_пп}^q$                                                                                                          | Уставки предыдущих комплектов РЗ, взаимодействующих с анализируемой ступенью.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Предварительно определенные с помощью RPTEC или ЭРМ.                                                                                                                                    |

Реализация данного варианта требует значительно меньших временных затрат. Недостатком является необходимость использования соответствующих сторонних программ или программно-технических средств моделирования ЭЭС. Однако, ввиду обязательного наличия данных инструментов на предполагаемых местах использования RPTEC (проектно-изыскательские организации, университеты, расчетные подразделения диспетчерских

управлений и др.) этот недостаток не является преградой для внедрения данной программы.

#### **4.2 Требования к программе и ее возможности**

Программа для широкого использования должна соответствовать следующим пользовательским и техническим требованиям:

1. Иметь интуитивно-понятный профессионально-ориентированный интерфейс пользователя.
2. Ошибки в работе программы или ее аварийное завершение не должны приводить к потере используемой базы данных.
3. Обладать высоким уровнем быстродействия.
4. Работать в наиболее распространенных операционных системах Windows XP, Windows 7 и др.

Выполнение первого требования предполагает наличие в программе специализированного сервиса, обеспечивающего весь необходимый инструментарий для комфортной и эффективной работы пользователя. В целом, сервис разрабатываемой программы должен предоставлять следующие возможности:

1. Создание, сохранение, редактирование, загрузку базы данных (содержание которой определяется таблицей 4.1) и графического изображения рассчитываемой схемы.
2. Расчет технической эффективности для заданной уставки.
3. Определение оптимальной уставки исходя из технической эффективности.
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 релейной защиты.

### **4.3 Среда программирования**

Программа с указанными возможностями может быть реализована на компиляторных языках программирования C, C++, Pascal, Delphi; межплатформенных языках с промежуточным внутренним представлением C#, Java, .Net и интерпретирующих языках Python, Ruby, php, Java Script.

Среди представленного списка языков полностью удовлетворяет всем указанным выше возможностям и требованиям система программирования Delphi. Выбор данной среды в качестве основного средства разработки программы РРТЕС также обусловлен следующими преимуществами над другими системами:

1. Качество визуальной среды разработки.

Визуальная среда разработки состоит из трех взаимосвязанных компонентов: редактора, отладчика и конструктора форм. Благодаря гармоничному взаимодействию этих трех компонентов Delphi является ускоренным инструментом разработки приложений (RAD – Rapid Application Development).

При работе в конструкторе форм Delphi неявно генерирует программный код всех тех компонентов, которые помещаются и обрабатываются в формах. Используется полностью объектно-ориентированная схема построения. В результате внесенные в базовые классы изменения немедленно распространяются и на любые производные от них классы.

В окне редактора Delphi в текст автоматически созданной программы можно внести необходимые дополнения, определяющие специфическое поведение данного приложения. Здесь же, в окне редактора, программы могут отлаживаться с помощью внесения точек останова, определения контролируемых переменных и т.д.

Отладчик Delphi поддерживает весь набор необходимых функциональных возможностей. Кроме того, Delphi предоставляет удобные средства управления графической средой отладки. Они позволяют в ходе отладки размещать и пристыковывать окна в любом удобном месте, а также запоминать сведения о полученной конфигурации в виде поименованной группы параметров настройки рабочего стола.

2. Скорость работы компилятора и быстродействие откомпилированных программ.

Быстрый компилятор позволяет разрабатывать программное обеспечение поэтапно, поскольку допускает многократное внесение в исходную программу небольших изменений, с последующей перекомпиляцией и тестированием. В результате возникает весьма эффективный цикл разработки. Более медленный компилятор вынуждает разработчика одновременно вносить больший объем изменений, комбинируя несколько отдельных доработок в одном цикле компиляции и отладки. Это снижает эффективность отдельных циклов разработки. Преимущества, достигаемые за счет повышенной эффективности работы откомпилированных программ, очевидны. Компилятор Delphi один из самых быстрых компиляторов языка высокого уровня из всех, существующих в среде Windows.

3. Мощь объектно-ориентированного языка Object Pascal являющегося фундаментом программирования в Delphi.

В отличие от императивной (Си, Basic, Fortran, Pascal) и функциональной (Лисп, Miranda) парадигм программирования (совокупности идей, понятий и правил, определяющих стиль построения программ [93]), основанных в общем случае на структурированных типах данных и неструктурных методах доступа к ним, объектно-ориентированная парадигма позволяет создавать абстрактные типы данных, свойства, структура и методы доступа к которым определяются термином «класс». Данное свойство объектно-ориентированного подхода позволяет естественным образом структурировать данные и методы доступа к

ним, что позволяет в конечном итоге существенно повысить качество, открытость, гибкость и сократить сроки разработки программ. Объектно-ориентированное программирование (ООП) является фактически стандартом программирования для всех оконных приложений. В общем случае объектно-ориентированный подход заключается в применении следующих основных принципов и понятий [94]:

- класс – это тип, описывающий общие свойства объектов;
- объект – это сущность в адресном пространстве;
- при вычислении используется взаимодействие (обмен данными между объектами, при котором один объект требует, чтобы другой объект выполнил некоторое действие;
- каждый объект имеет независимую память, состоящую из других объектов, которые рассматриваются как свойства и методы основного объекта;
- каждый объект является представителем (экземпляром) класса, который выражает общие свойства объектов;
- в классе задается поведение (функциональность) объекта;
- классы организованы в единую древовидную структуру с общим корнем, отражающую иерархию наследования;
- наследование – порождение одного класса от другого с сохранением всех свойств и методов класса-предка.

4. Большое количество поддерживаемых средой разработки шаблонов проектирования.

Большое количество встроенных компонентов, облегчающих создание готового приложения, является главным достоинством Delphi. Возможность манипулирования компонентами непосредственно в процессе проектирования, средства разработки собственных компонентов, наследующих элементы своего поведения от других компонентов с помощью различных объектно-

ориентированных технологий – все это является важнейшими условиями высокого уровня продуктивности, свойственного среде Delphi [95].

#### 4.4 Программная структура

Программа разработана в объектно-ориентированном стиле с использованием механизмов наследования, инкапсуляции и полиморфизма данных. Подобный подход позволяет создать гибкое средство, которое может расширяться (добавление расчета технической эффективности для разных типов РЗ), совершенствоваться и при необходимости модифицироваться с минимальными трудовыми затратами.

В соответствии с разработанным в главе 3 математическим обеспечением определения технической эффективности, изложенными в разделах 4.1-4.3 требованиями и возможностями программы, на рисунке 4.2 представлена структура классов RPTEC, на рисунке 4.3 – классы технической эффективности.

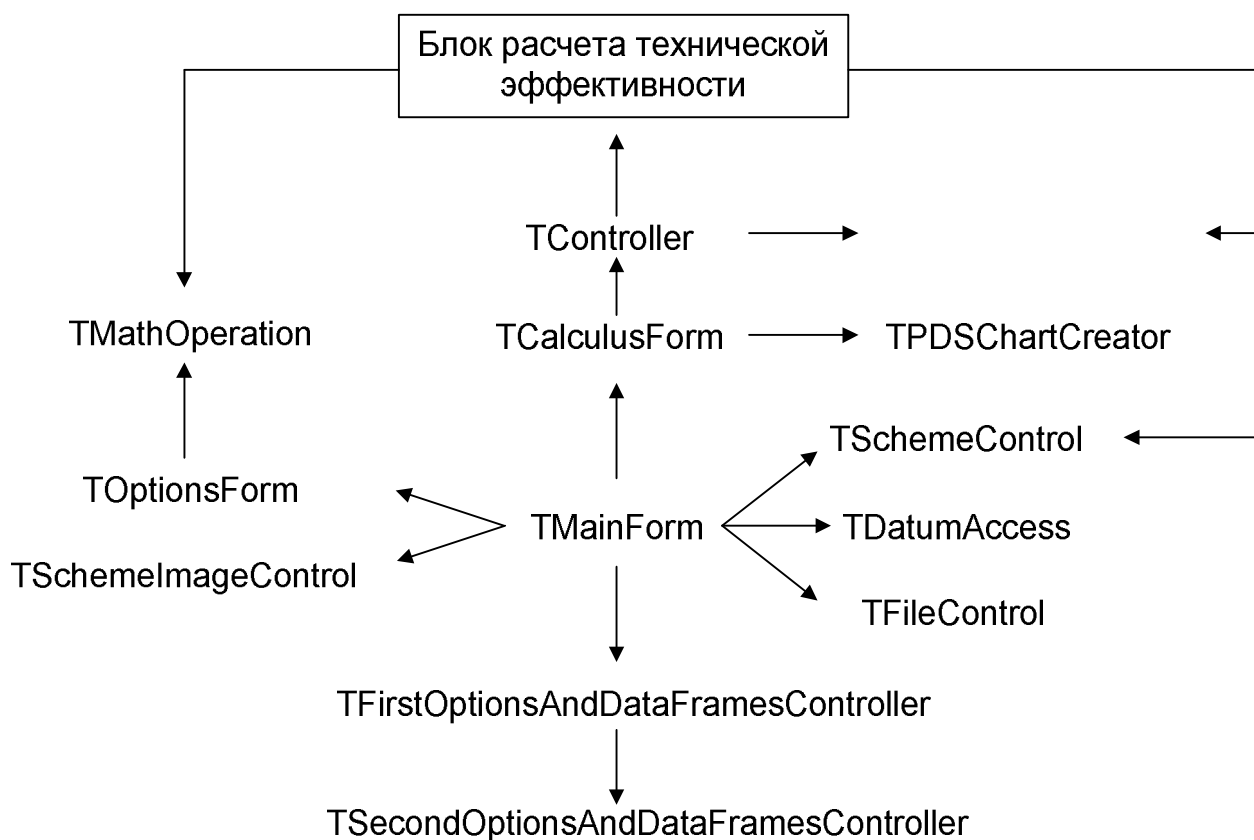


Рисунок 4.2 – Структура классов RPTEC

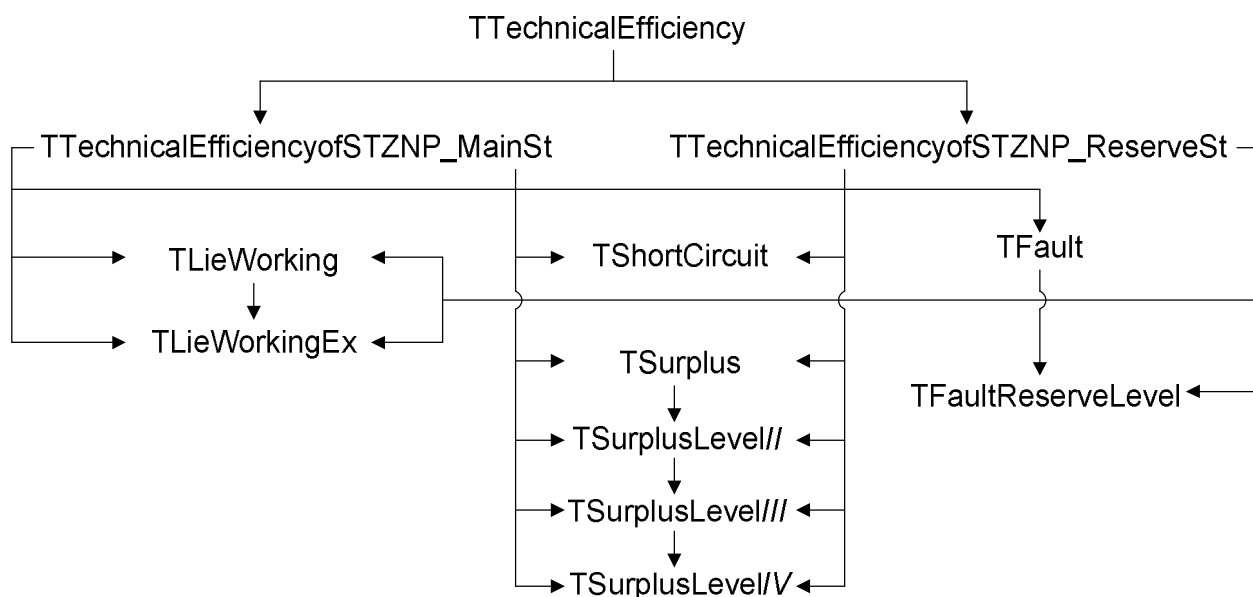


Рисунок 4.3 – Структура классов технической эффективности ступенчатой токовой защиты нулевой последовательности

Назначения классов, представленных на рисунках, сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Назначение разработанных классов

| Имя класса                             | Назначение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TMainForm                              | Класс главной формы программы. Предоставляет пользователю контроль над всем сервисом RPTEC.                                                                                                                                                                                                                                                          |
| TFirstOptions-AndDataFramesController  | Реализует заданную топологию схемы рассчитываемого района, включая визуальное представление для пользователя. Осуществляет управление фреймами элементов первой периферии и элементов второй периферии. Фреймы предыдущих элементов содержат совокупность компонентов для управления данными этих элементов (линий и трансформаторов) пользователем. |
| TSecondOptions-AndDataFramesController | Класс является родителем (согласно терминологии ООП) для TFirstOptionsAndDataFramesController. В соответствии с названием, осуществляет контроль над фреймами второй периферии.                                                                                                                                                                      |
| TFileControl                           | Класс для управления служебными файлами программы и файлами пользователя (открытие, сохранение базы данных схемы и др.).                                                                                                                                                                                                                             |
| TDatumAccess                           | Класс для передачи данных схемы из компонентов главной формы программы в класс их хранения (TSchemeContol) и обратно.                                                                                                                                                                                                                                |

| Имя класса                          | Назначение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TSchemeControl                      | Класс для динамического хранения всех данных по рассчитываемой схеме и управления ими.                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| TPDSChartCreator                    | Класс для формирования графиков плотности распределения вероятностей. Реализует инструментарий для визуального отображения графика ПРВ, заданных границ на оси абсцисс и др.                                                                                                                                                                                                         |
| TResultProbabilities                | Класс для хранения результатов расчета вероятностных составляющих технической эффективности (условных и безусловных вероятностей событий).                                                                                                                                                                                                                                           |
| TController                         | Класс для управления процессом расчета технической эффективности, т.е. потомками абстрактного класса TTechnicalEfficiency.                                                                                                                                                                                                                                                           |
| TCalculusForm                       | Класс формы расчетов РРТЕС. Посредством данного класса реализуются алгоритмы расчета технической эффективности для выставленной уставки, осуществляется поиск оптимальной уставки и построение графика технической эффективности от уставки, а также характеристик ПРВ.                                                                                                              |
| TOptionsForm.                       | Класс формы настроек программы (задание вычислительных параметров программы, включая коэффициенты, вероятности используемых видов КЗ, и вспомогательных).                                                                                                                                                                                                                            |
| TSchemeImageForm                    | Класс формы иллюстрации рассчитываемой схемы.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| TMathOperation                      | Класс, инкапсулирующий математические операции программы. Реализует алгоритмы вычисления функции Лапласа, коэффициентов небаланса, среднеквадратического отклонения и математического ожидания по правилу трех сигма, условной вероятности рассматриваемых событий при нормальном ЗРВ и др. Часть методов класса не требуют создания его экземпляра и могут быть вызваны статически. |
| TTechnicalEfficiency                | Абстрактный базовый класс для расчета технической эффективности.<br>Инкапсулирует основные методы и поля, соответствующие условным и безусловным вероятностям математического представления технической эффективности. Расчет данных составляющих реализуются в наследуемых от данного классах, которые учитывают особенности различных видов РЗ.                                    |
| TTechnicalEfficiency-OfSTZNP_MainSt | Класс для вычисления технической эффективности основных (первой, второй и третьей) ступеней СТЗНП. При этом для каждой ступени создаются экземпляры данного класса с передачей параметров соответствующих каждой ступени.                                                                                                                                                            |

| Имя класса                                                                  | Назначение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TTechnicalEfficiency-OfSTZNP_ReserveSt.                                     | Класс для вычисления технической эффективности резервирующей (как правило, четвертой) ступени СТЗНП. Особенностью данной ступени является расчет отказов на предыдущих элементах и излишних действий на элементах второй периферии, что и обусловило создание отдельного класса.                                                                                                    |
| TLieWorking                                                                 | Класс для расчета вероятности ложной работы канала РЗ в асинхронном и неполнофазном режиме. С точки зрения расчета ложных действий, данные режимы отличаются только параметрами ЗРВ. Поэтому расчет осуществляется через отдельные экземпляры данного класса, которым передаются параметры соответствующего режима.                                                                 |
| TLieWorkingEx                                                               | Класс-потомок от класса TLieWorking. Реализует расчет вероятности ложной работы канала РЗ в эксплуатационном режиме, который принципиально отличается от расчета ложных действий в неполнофазном и асинхронном режимах определением безусловной вероятности эксплуатационного режима. Последняя вычисляется как разность единицы и вероятностей других режимов функционирования РЗ. |
| TFault                                                                      | Класс расчета вероятности отказа защиты при КЗ.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| TFaultReserveLevel                                                          | Класс наследуется от TFault. Реализует расчет вероятности резервирующей ступени СТЗНП. Необходимость в данном классе возникла в связи с тем, что отказы резервирующей ступени рассчитываются на автоматизируемой линии, а также на первой периферии. В последнем случае необходимо учитывать коэффициент токораспределения, что в базовом классе отсутствует.                       |
| TShortCircuit                                                               | Класс для расчета безусловной вероятности повреждения объекта.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| TSurplusLevelI,<br>TSurplusLevelII,<br>TSurplusLevelIII,<br>TSurplusLevelIV | Классы для расчета излишних действий первой, второй, третьей и четвертой (резервирующей ступени). Последующий класс наследуется от предыдущего для реализации с перезагрузкой собственно метода расчета соответствующей вероятности, что позволяет учесть особенности, изложенные во второй главе.                                                                                  |

Диаграмма и описание каждого класса позволяют составить общую картину функционирования RPTEC.

## 4.5 Дизайн программных форм

### 4.5.1 Главная форма программы

Класс TMainForm реализует главную форму программы (рисунок 4.4).

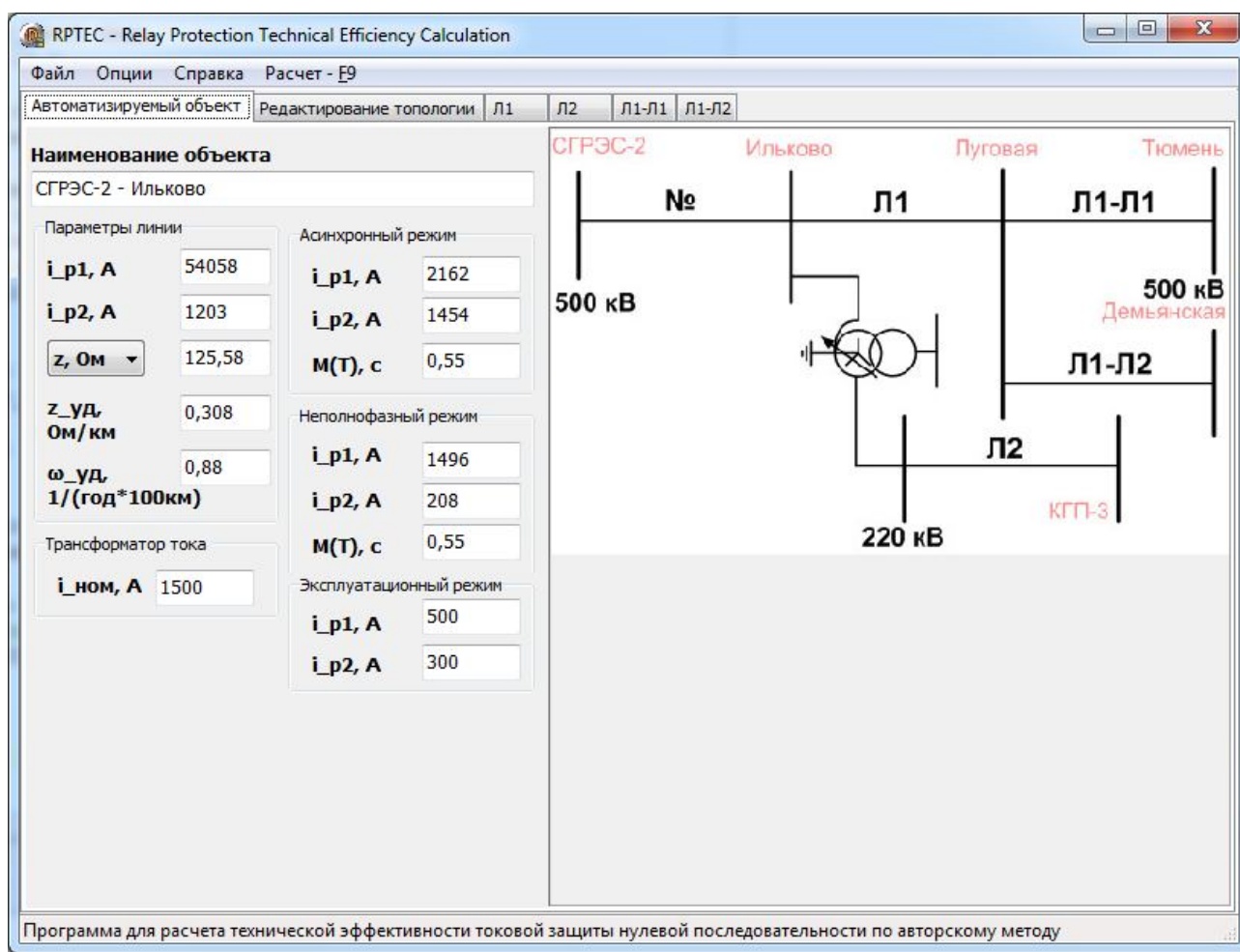


Рисунок 4.4 – Главная форма программы RPTEC. Активная вкладка:

«Автоматизируемый объект»

Главная форма включает в себя две обязательные вкладки: «Автоматизируемый объект» и «Редактирование топологии». На первой вкладке пользователь осуществляет ввод необходимых для расчета данных по автоматизируемому объекту – линии в соответствии с таблицей 4.1.

При активизации вкладки «Редактирование топологии» (рисунок 4.5) пользователь может редактировать топологию сети: добавлять и удалять элементы первой и второй периферии (данные возможности реализованы посредством классов `TFirstOptionsAndDataFramesController` и `TSecondOptionsAndDataFramesController`). Обозначение элементов, состоящее из типа элемента (Л – линия) и порядкового номера, при этом проставляется автоматически. Обозначение элементов второй периферии включает в себя обозначение соответствующего элемента первой периферии.

Кроме того, данная вкладка позволяет включать/отключать учет отдельных элементов в расчетах технической эффективности (столбец «Учет в расчетах»). Необходимость в этом возникает для исследования влияния параметров периферийных элементов (уставок установленных на них релейных защит, режимных и конструктивных параметров) на техническую эффективность рассчитываемого канала релейной защиты.

Рисунок 4.5 – Главная форма программы RPTEC. Активная вкладка:

«Редактирование топологии»

После добавления предыдущего элемента становятся доступны вкладки для редактирования параметров данного элемента (рисунки 4.6÷4.8).

Для примера, на приведенных рисунках 4.4÷4.8 описана топология сети для автоматизируемой линии СГРЭС-2 – Ильково 500 кВ Тюменской энергосистемы, включающая в себя помимо данной линии также линию первой периферии Ильково – Луговая (Л1) и две линии второй периферии Луговая –

Тюмень (Л1Л1) и Луговая – Демьянская (Л1Л2). Все данные вводятся пользователем в соответствии с таблицей 4.1.

The screenshot shows the main window of the RPTEC software. The title bar reads 'RPTEC - Relay Protection Technical Efficiency Calculation'. The menu bar includes 'Файл', 'Опции', 'Справка', and 'Расчет - F9'. The 'Автоматизируемый объект' (Automatized object) tab is active, showing 'Л1' selected. The 'Наименование предыдущей линии' (Previous line name) is 'Ильково - Луговая'.

**Параметры линии** (Line parameters):

|                                                  |        |
|--------------------------------------------------|--------|
| $i_{p1}$                                         | 3535   |
| $i_{p2}, A$                                      | 570    |
| $z, \Omega$                                      | 190,35 |
| $z_{уд}, \Omega/\text{км}$                       | 0,308  |
| $\omega_{уд}, 1/(\text{год} \cdot 100\text{км})$ | 0,88   |

**Коэфф. токораспределения** (Current distribution coefficients):

|                |       |
|----------------|-------|
| $ka$           | 0,454 |
| $ki$           | 0,414 |
| $ia_{Пред}, A$ | 3272  |
| $ii_{Пред}, A$ | 3088  |

**Распределение тока КЗ ЗИО** (Short-circuit current distribution):

|           |      |
|-----------|------|
| $ia_n, A$ | 3272 |
| $ia_k, A$ | 752  |
| $ii_n, A$ | 3424 |
| $ii_k, A$ | 763  |

**Установленные защиты** (Installed protections):

☒ Токовая защита нулевой последовательности

**Параметры СТЗНП** (STZNP parameters):

| Уставки ступеней, A | Время действия, с |
|---------------------|-------------------|
| $zi0_I$ 2292        | $M(T)_I$ 0,05     |
| $zi0_{II}$ 462      | $M(T)_{II}$ 0,55  |
| $zi0_{III}$ 376     | $M(T)_{III}$ 1,05 |
| $zi0_{IV}$ 100      | $M(T)_{IV}$ 2,55  |

At the bottom, a status bar reads: 'Программа для расчета технической эффективности токовой защиты нулевой последовательности по авторскому методу'.

Рисунок 4.6 – Главная форма программы RPTEC. Активна вкладка редактирования параметров элемента первой периферии

RPTEC - Relay Protection Technical Efficiency Calculation

Файл Опции Справка Расчет - F9

Автоматизируемый объект Редактирование топологии Л1 Л2 Л1-Л1 Л1-Л2

**Наименование предыдущей линии**  
 Луговая - Тюмень

**Параметры линии**

**Коэфф. токораспределения**

**Установленные защиты**  
☒ Токовая защита нулевой последовательности

**-----Параметры СТЗНП-----**

| Уставки ступеней, А |     | Время действия, с |      |
|---------------------|-----|-------------------|------|
| 3i0_I               | 0   | M(T)_I            | 0    |
| 3i0_II              | 0   | M(T)_II           | 0    |
| 3i0_III             | 0   | M(T)_III          | 0    |
| 3i0_IV              | 147 | M(T)_IV           | 2,05 |

**Распределение тока КЗ 3i0**

Программа для расчета технической эффективности токовой защиты нулевой последовательности по авторскому методу

Рисунок 4.7 – Главная форма программы RPTEC. Активна вкладка редактирования параметров элемента второй периферии

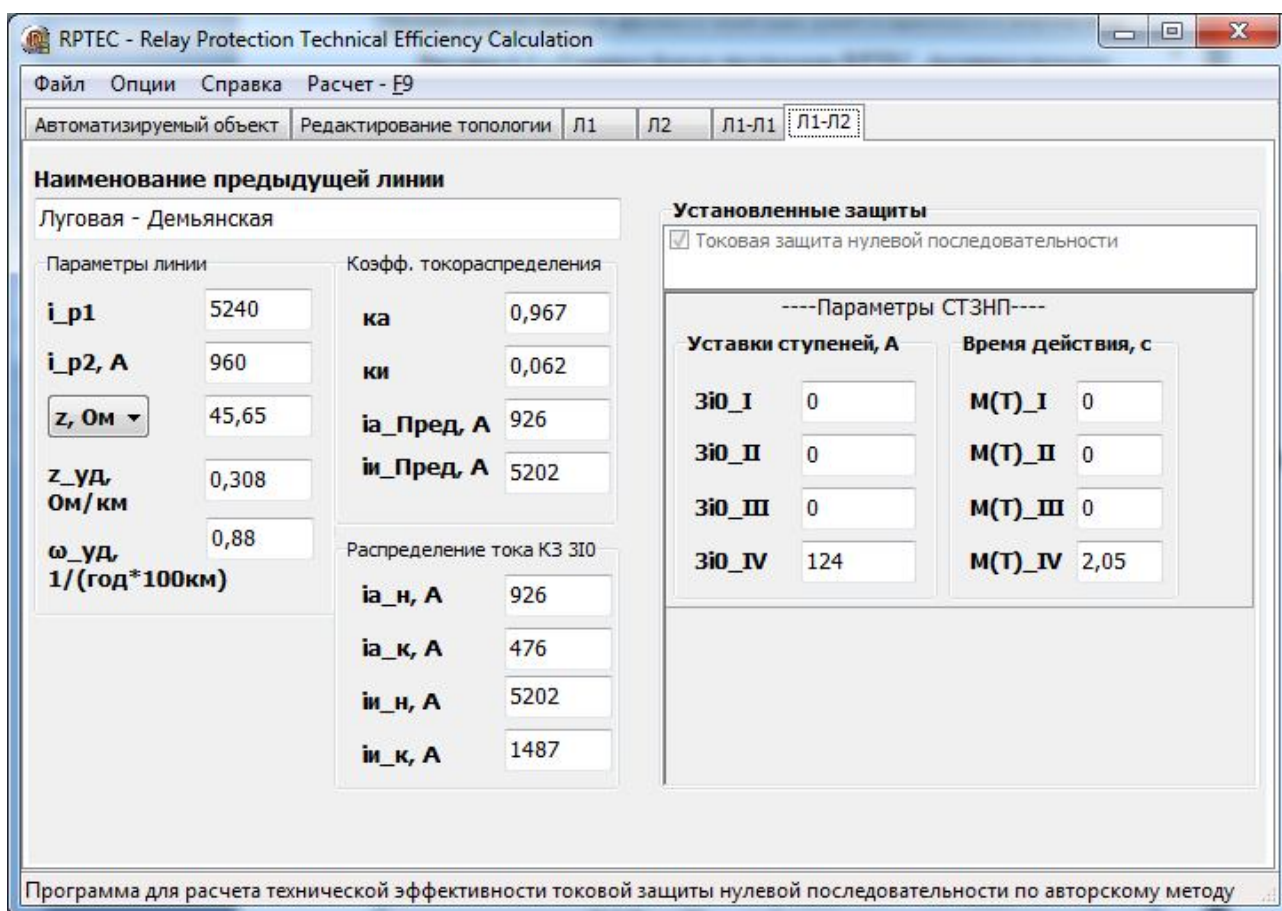


Рисунок 4.8 – Главная форма программы RPTEC. Активна вкладка редактирования параметров элемента второй периферии

Также на главной форме пользователю доступны стандартные для офисного программного обеспечения элементы меню: открыть, сохранить схему (реализованы с помощью класса TFileControl), настройки и справочная информация.

Программа сохраняет базу исходных данных по схеме в открытом формате ini-файла. Изображение схемы при этом сохраняется под тем же именем в формате Jpeg. Использование стандартных форматов обеспечивает совместимость с другими соответствующими программами (текстовые и графические редакторы), что при необходимости позволяет производить печать и редакцию из сторонних программ.

## 4.5.2 Форма расчетов технической эффективности и протоколирования результатов

Для перехода в режим расчетов достаточно выбрать в меню команду «Расчет – F9», что активирует соответствующую форму (рисунки 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.14).

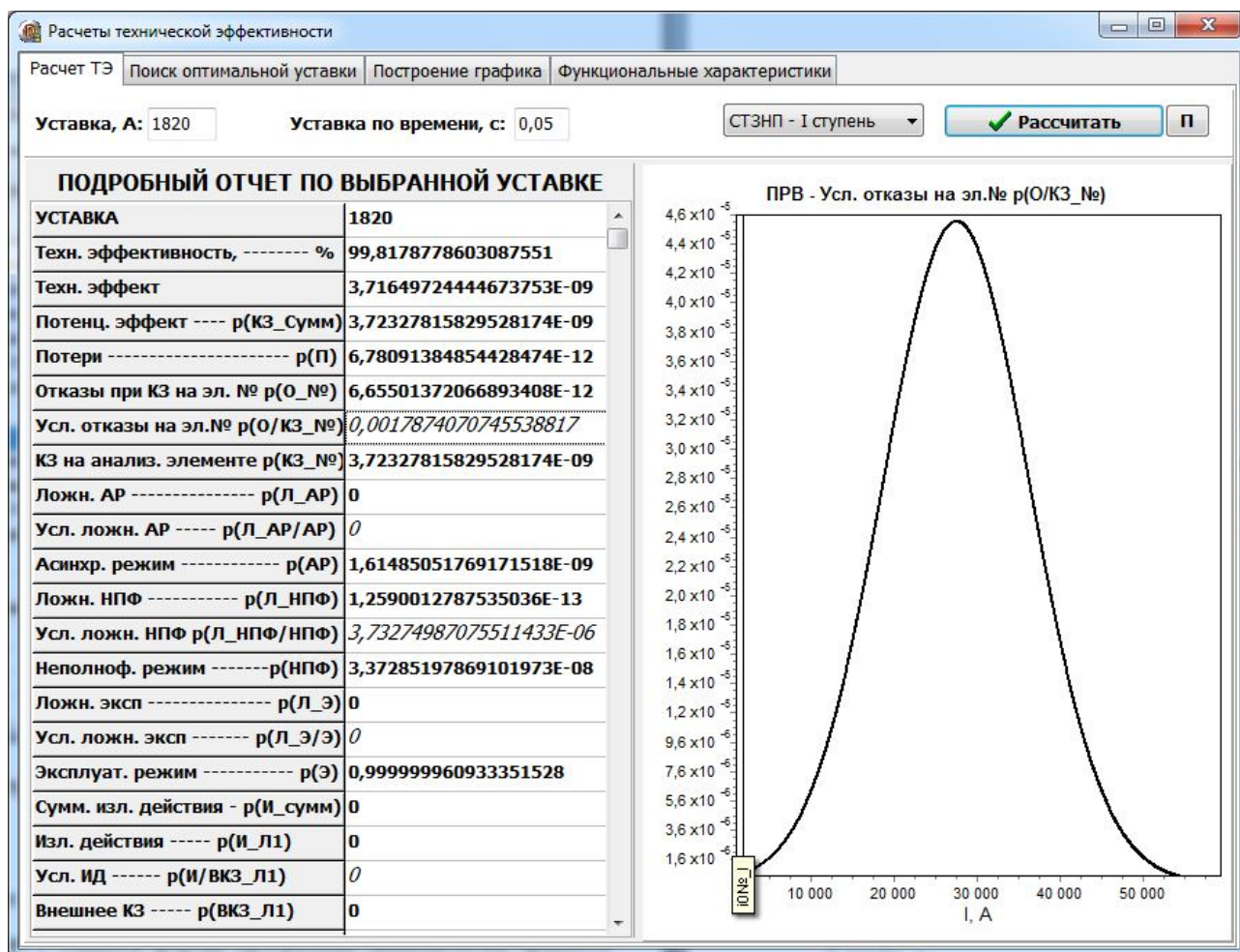


Рисунок 4.9 – Форма расчетов технической эффективности, их протоколирования (активная вкладка расчета технической эффективности для заданной уставки)

Рассматриваемая форма состоит из четырех специализированных вкладок, в которых представлены следующие возможности:

1. Расчет ТЭ. Реализует расчет технической эффективности для введенной пользователем уставки (рисунок 4.9).

В данном режиме работы пользователь задает токовую и временную уставки, выбирает интересующий канал РЗ (первая, вторая, третья и резервирующая четвертая ступени для СТЗНП) и нажимает кнопку «Рассчитать». В результате, программа формирует протокол расчета в табличном виде (левая часть формы) и графические иллюстрации расчетов условных вероятностей отказов, ложных и излишних действий (правая часть формы).

В протоколе расчета с точностью до 19 знака после запятой приведены все интересующие величины: техническая эффективность, технический эффект, потери, условные и безусловные вероятности:

- отказов срабатывания;
- ложных действий в неполнофазном, асинхронном и эксплуатационном режимах;
- излишних действий на каждом предыдущем элементе и их сумма;
- короткого замыкания на рассчитываемом элементе, суммарного короткого замыкания при КЗ на всех элементах, на которых рассматриваются отказы (актуально для резервирующей ступени, с областью действия распространенной на первую периферию);
- внешнего короткого замыкания при КЗ на всех элементах, на которых рассматриваются излишние действия;
- действия и отказы взаимодействующих с рассчитываемой ступенью каналов РЗ.

Графические иллюстрации доступны пользователю при выборе соответствующей каждой условной вероятности строки в таблице (выделено курсивом, рисунок 4.9). На иллюстрации отображается вычисленная плотность распределения вероятности тока интересующего режима (эксплуатационного, асинхронного, неполнофазного, короткого замыкания на элементе и внешнего короткого замыкания) и границы оси абсцисс, определяющие полученные величины условных вероятностей. Таким образом, с помощью

сформированных программой графических характеристик пользователь может проконтролировать и оценить в графической форме результаты, представленные в таблице протокола.

2. Построение графика функции технической эффективности в зависимости от уставки (рисунок 4.10).

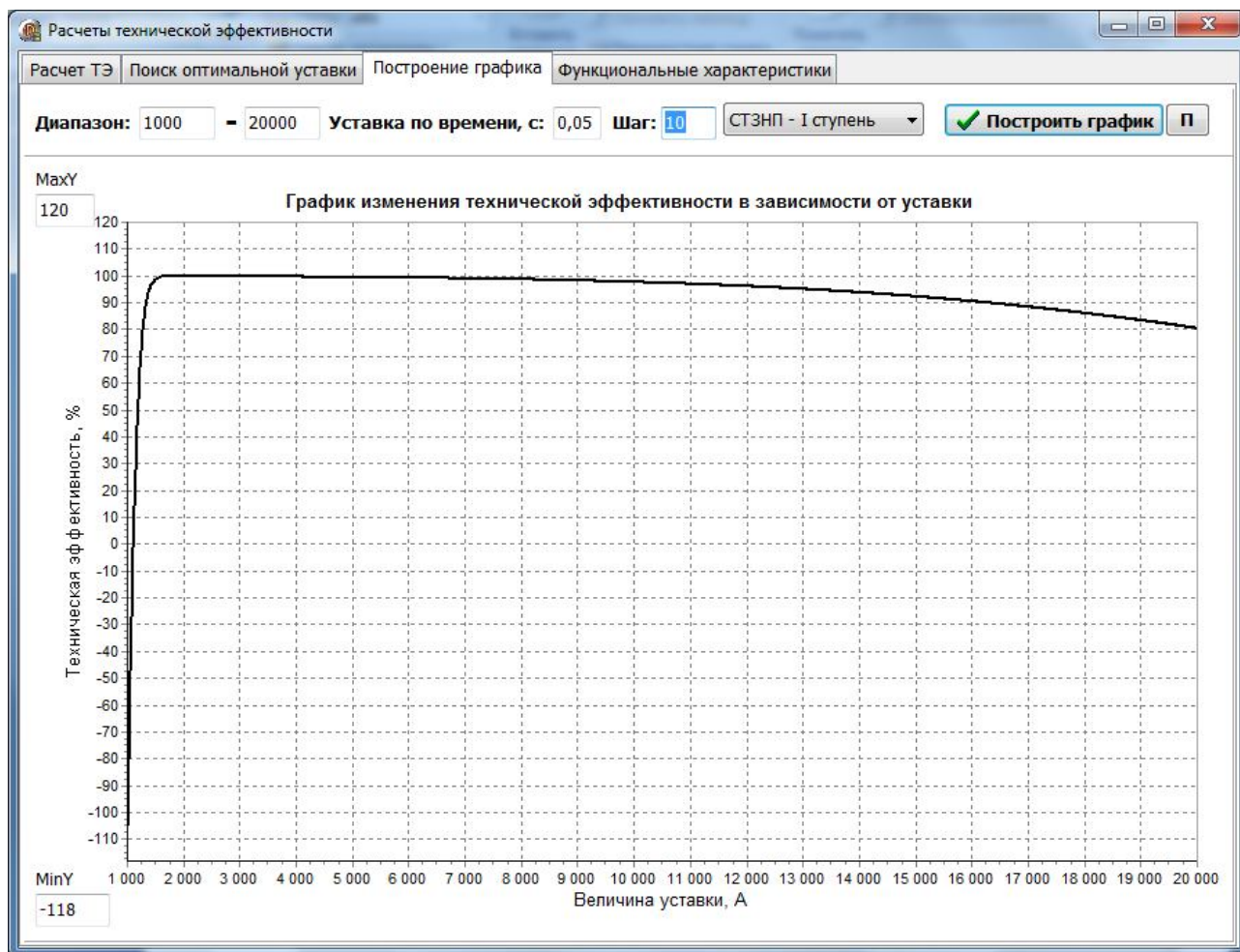


Рисунок 4.10 – Построение графика технической эффективности

Разработанное математическое обеспечение, алгоритм и программа расчета технической эффективности релейной защиты, в совокупности предоставляющие возможность построения графика технической эффективности канала релейной защиты в зависимости от его настройки (уставки), позволяют впервые ставить и решать следующие задачи:

- Оценивать степень «адаптированности», т.е. пригодности релейной защиты к работе на данном элементе сети инфраструктуры. Можно выделить три типа кривых технической эффективности, согласно рисунку 4.11.

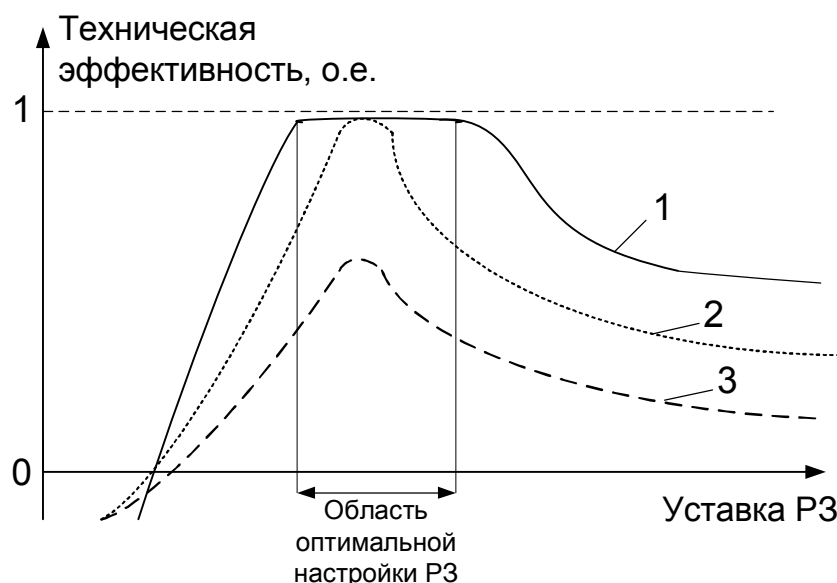


Рисунок 4.11 – Виды кривых технической эффективности: 1 - кривая соответствует технической эффективности для защит, естественно адаптированных к сетевой инфраструктуре; 2 – кривая для слабо-адаптированных защит; 3 – кривая для неадаптированных защит.

- Оценивать степень робастности. Робастность определяется диапазоном высокоэффективных уставок. Чем больше данный диапазон, тем робастнее защита (область оптимальной настройки на рисунке 4.11).

- Объективно назначать уставку защиты, обеспечивающую большую селективность, но меньшую чувствительность, и, наоборот, большую чувствительность, но меньшую селективность для защит, обладающих достаточной степенью робастности. Из рисунка 4.11 видно, что на кривой номер 1 имеется область, близкая к одной относительной единице или ста процентам. Данную область можно назвать областью оптимальной настройки. Вдоль этой области можно свободно варьировать настройкой РЗ в зависимости от поставленных задач (условий). Например, в случае защиты максимального действия:

А) для обеспечения лучшей селективности, можно увеличивать уставку без потери технического эффекта до правой границы области;

Б) для обеспечения лучшей чувствительности, можно уменьшать уставку без потери технического эффекта до левой границы области.

### 3. Поиск оптимальной уставки (рисунок 4.12).

Расчеты технической эффективности

Расчет ТЭ Поиск оптимальной уставки Построение графика Функциональные характеристики

Нач. уставка, А: 1000 Уставка по времени, с: 0,05 Шаг: 10 СТЗНП - I ступень

**ОТЧЕТ ПО ВЫЧИСЛЕННОЙ ОПТИМАЛЬНОЙ УСТАВКЕ**

| УСТАВКА                         | 1820                    |
|---------------------------------|-------------------------|
| Техн. эффективность, ----- %    | 99,8178778603087551     |
| Техн. эффект                    | 3,71649724444673753E-09 |
| Потенц. эффект ---- p(КЗ_Сумм)  | 3,72327815829528174E-09 |
| Потери ----- p(П)               | 6,78091384854428474E-12 |
| Отказы при КЗ на эл. № p(О_№)   | 6,65501372066893408E-12 |
| Усл. отказы на эл. № p(О/КЗ_№)  | 0,0017874070745538817   |
| КЗ на анализ. элементе p(КЗ_№)  | 3,72327815829528174E-09 |
| Ложн. АР ----- p(Л_АР)          | 0                       |
| Усл. ложн. АР ----- p(Л_АР/АР)  | 0                       |
| Асинхр. режим ----- p(АР)       | 1,61485051769171518E-09 |
| Ложн. НПФ ----- p(Л_НПФ)        | 1,2590012787535036E-13  |
| Усл. ложн. НПФ p(Л_НПФ/НПФ)     | 3,73274987075511433E-06 |
| Неполноф. режим ----- p(НПФ)    | 3,37285197869101973E-08 |
| Ложн. эксп ----- p(Л_Э)         | 0                       |
| Усл. ложн. эксп ----- p(Л_Э/Э)  | 0                       |
| Эксплуат. режим ----- p(Э)      | 0,999999960933351528    |
| Сумм. изл. действия - p(И_сумм) | 0                       |
| Изл. действия ---- p(И_Л1)      | 0                       |
| Усл. ИД ----- p(И/ВКЗ_Л1)       | 0                       |
| Внешнее КЗ ----- p(ВКЗ_Л1)      | 0                       |

**ПЕРЕБОР УСТАВОК**

| УСТАВКА                  | 1000                     |
|--------------------------|--------------------------|
| Техн. эффективность, %   | -118,076752050004089     |
| Техн. эффект             | -4,39632591910227854E-09 |
| Потенц. эффект p(КЗ_Сум) | 3,72327815829528174E-09  |
| Потери p(П)              | 8,11960407739755986E-09  |
| УСТАВКА                  | 990                      |
| Техн. эффективность, %   | -131,553342242796845     |
| Техн. эффект             | -4,89809685823349495E-09 |
| Потенц. эффект p(КЗ_Сум) | 3,72327815829528174E-09  |
| Потери p(П)              | 8,62137501652877627E-09  |
| УСТАВКА                  | 1010                     |
| Техн. эффективность, %   | -105,055183709568141     |
| Техн. эффект             | -3,91149670921533359E-09 |
| Потенц. эффект p(КЗ_Сум) | 3,72327815829528174E-09  |
| Потери p(П)              | 7,63477486751061491E-09  |
| УСТАВКА                  | 1020                     |
| Техн. эффективность, %   | -92,4994094295229274     |
| Техн. эффект             | -3,44401030784155358E-09 |
| Потенц. эффект p(КЗ_Сум) | 3,72327815829528174E-09  |
| Потери p(П)              | 7,16728846613683532E-09  |

Рисунок 4.12 – Поиск оптимальной уставки

Оптимальная уставка есть уставка, обеспечивающая наибольшую величину технической эффективности или наименьшую величину потерь защиты. Потери защиты определяются отказами, ложными и излишними действиями. В случае защиты максимального действия, возрастание уставки от оптимальной до плюс бесконечности приводит к увеличению отказов, и к уменьшению ложных и излишних действий. Обратная тенденция имеет место при уменьшении уставки от оптимального значения до минус бесконечности –

уменьшение отказов и увеличение ложных и излишних действий. Аналогично можно рассмотреть защиты минимального действия.

Рассмотренные соотношения имеют место при любых удельных весах защиты, установленных в выражении технической эффективности (3.1, 3.33) (например, в качестве коэффициента важности, отмеченного в разделе 3.2). Более того, они обусловлены принципом работы РЗ, а не разработанным способом определения технической эффективности.

Результатом данного анализа является следующий вывод: кривая технической эффективности в зависимости от уставки имеет только одну точку максимума и не имеет точек минимума. Согласно данному выводу, в разработанной программе точка максимума определяется по алгоритму, представленному на рисунке 4.13.

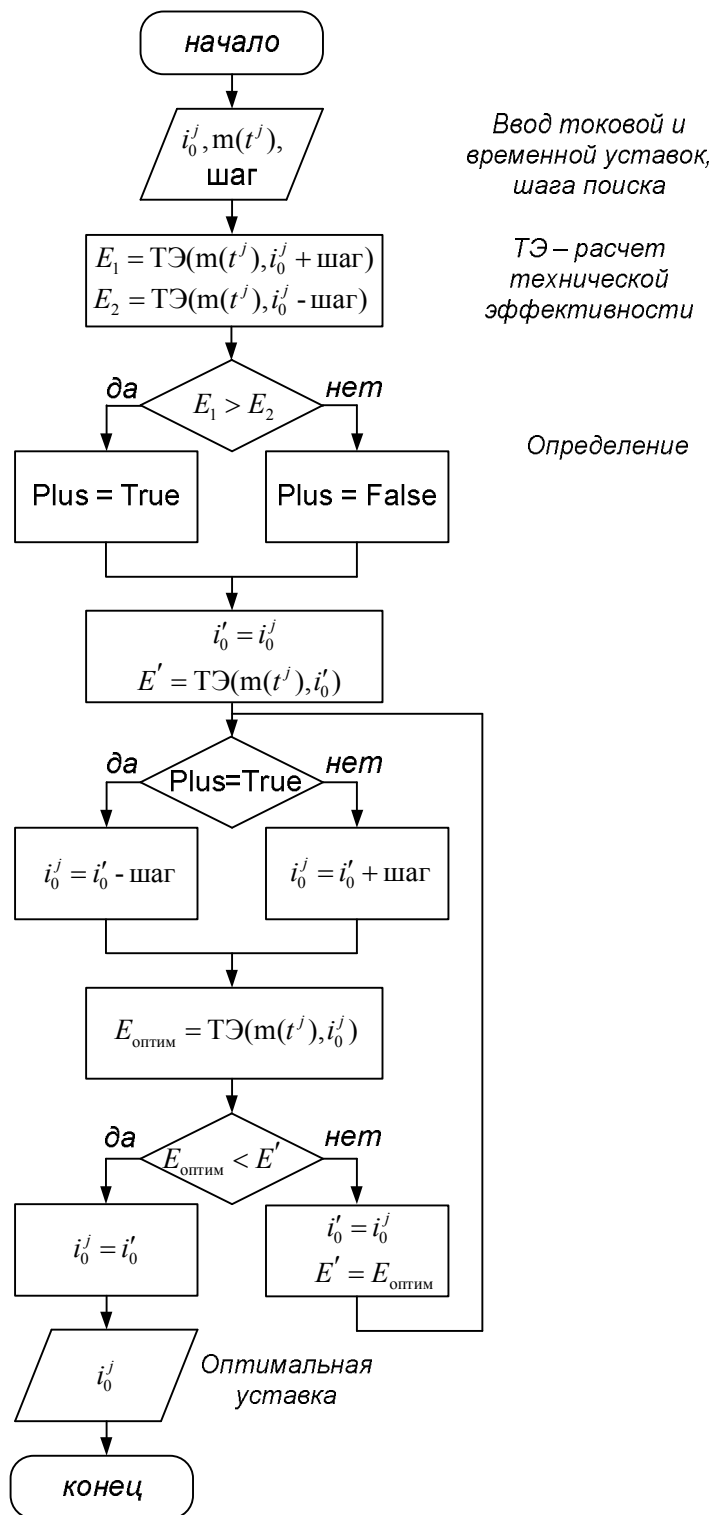


Рисунок 4.13 – Алгоритм определения оптимальной уставки

Из алгоритма следует, что для определения оптимальной уставки, необходимо корректно задать начальную уставку (с которой начинается поиск). Начальная уставка должна быть принята из диапазона оптимальных уставок, определенного по графику технической эффективности.

Результаты определения оптимальной уставки оформляются в виде двух табличных протоколов (рисунок 4.12):

- Таблица протокола поиска уставок. Результаты поиска группируются по пяти табличным строкам. В каждой группе приводится значение итерационной уставки и соответствующие ей величины технической эффективности, технического эффекта, потенциального эффекта и потерь. Такие группы приводятся для каждой уставки, пока не обнаруживается оптимальная.
- Таблица отчета по вычисленной оптимальной уставки аналогична таблице из режима расчета технической эффективности для заданной уставки.

4. Функциональные характеристики (рисунок 4.14). Вспомогательная вкладка. Отображает плотность распределения вероятности с заданными границами на оси абсцисс. Может использоваться для качественного анализа полученных результатов. Позволяет редактировать полученные результаты расчета и строить пользовательские характеристики (реализовано на базе класса `TPDSChartCreator`).

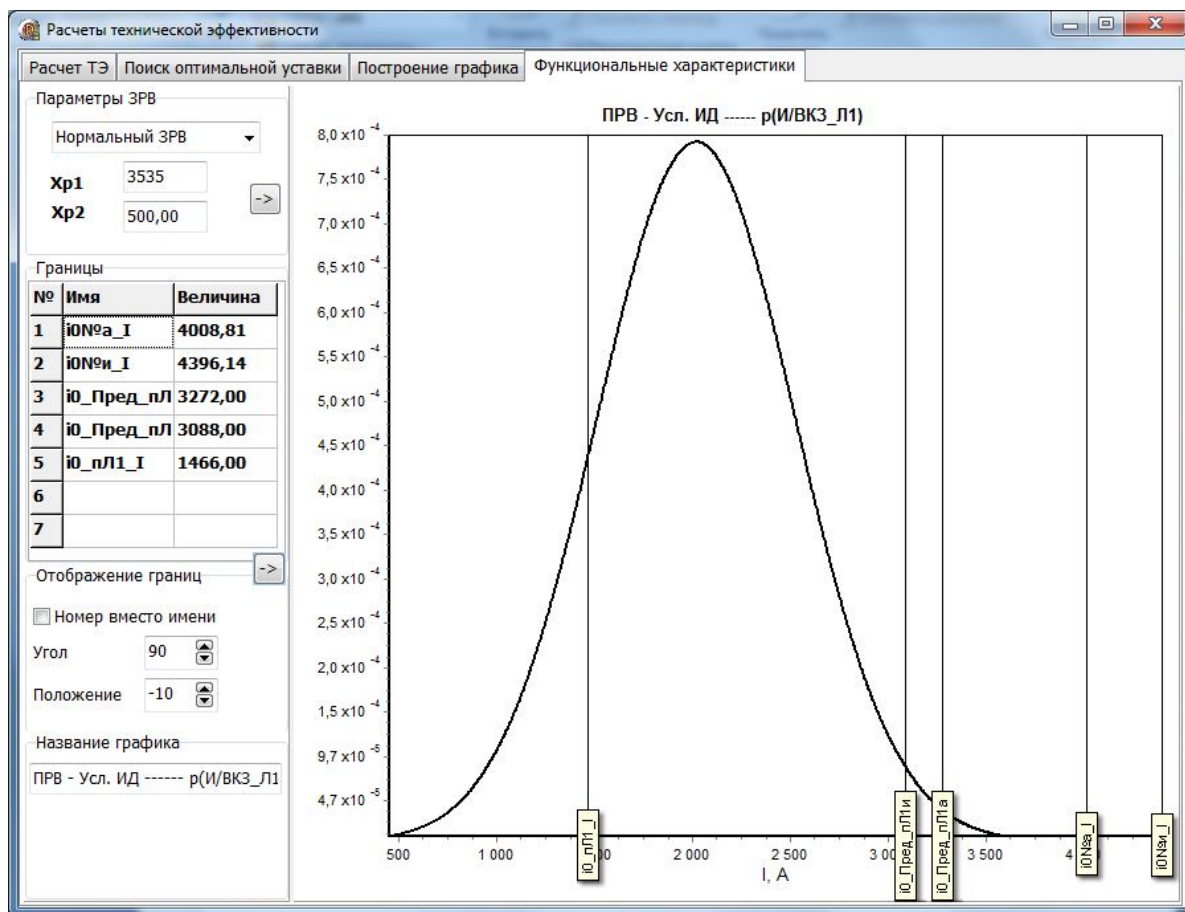


Рисунок 4.14 – Функциональные характеристики

Названные возможности по отмеченным выше пунктам 1-3 реализованы на базе разработанной программной структуры классов расчета технической эффективности согласно рисункам 4.2 и 4.3. Все необходимые для расчета технической эффективности данные, введенные с главной формы программы, структурировано хранятся в полях класса `TSchemeControl`. Доступ к этим структурам с рассматриваемой формы реализуется посредством вспомогательного класса `TDatumAccess`. Далее соответствующие наследники абстрактного класса `TEchnicalEfficiency` - `TEchnicalEfficiencyOfSTZNP_MainSt` для первой и третьей ступеней СТЗНП и `TEchnicalEfficiency-OfSTZNP_ReserveSt` для резервирующей ступени СТЗНП – реализуют передачу необходимой информации в соответствующие классы расчета вероятностных составляющих технической эффективности: `TLieWorking` (ложные действия в неполнофазном и асинхронном режимах), `TLieWorkingEx` (ложные действия в эксплуатационном режиме), `TFault` (отказ

действия при КЗ на защищаемой элементе), TFaultReserveLevel (отказ действия при КЗ на резервирующих элементах), TShortCircuit (короткое замыкание), TSurplusLevelI (излишние действия первой ступени), TSurplusLevelII (излишние действия второй ступени), TSurplusLevelIII (излишние действия третьей ступени), TSurplusLevelIV (излишние действия четвертой ступени). Результаты всех расчетов агрегируются в классе TResultProbabilities. Данная программная реализация позволила обеспечить высокий уровень быстродействия и гибкости программы.

Для удобства работы, пользователю во всех режимах доступны необходимые дополнительные инструменты: сохранение результатов, в том числе графических, в буфер обмена; вывод на печать; управление способом отображения информации и др.

#### 4.5.3 Форма задания параметров расчета

Для задания статистических величин, коэффициентов и удельных весов разработана соответствующая форма настроек. Форма задания параметров расчета имеет три вкладки (рисунки 4.13÷4.15). На каждой вкладке настроечные параметры сгруппированы по назначению.

Задание параметров расчета

Кoeffициенты | Статистические данные | Кoeffициент небаланса нулевой последов.

Задание удельных весов

$$TЭ = \frac{p(A)k_A - p(O)k_O - p(LЭ)k_{LЭ} - p(LАР)k_{LАР} - p(LНПФ)k_{LНПФ} - p(ИД)k_{ИД}}{p(A)k_A}$$

| к <sub>А</sub> | к <sub>О</sub> | к <sub>ЛЭ</sub> | к <sub>ЛАР</sub> | к <sub>ЛНПФ</sub> | к <sub>ИД</sub> |
|----------------|----------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|
| 1              | 1              | 1               | 1                | 1                 | 1               |

**Уточнение определения квантиля p2=0,0013**

Кoeffициент промежуточного аварийного режима: 1,14

Кoeffициент промежуточного эксплуатационного режима: 1,9

Вероятность излишнего действия рассчитываемой защиты при действии одновременной предыдущей: 0,5

Рисунок 4.13 – Форма задания параметров расчета. Установка коэффициентов

Первая вкладка позволяет производить следующие настройки:

1. Удельные веса (коэффициенты в выражении технической эффективности).
2. Коэффициенты для определения квантиля  $p_2=0,0013$ . Определение квантиля  $p_2$  по методу СГИД с помощью вычислительно расчетных комплексов в ряде случаев оказывается затруднительным, т.к. необходимость задания минимально возможной нагрузки и генерации приводит к сложности или невозможности расчета соответствующего режима. Однако, экспериментально выяснено, что разгрузка генерирующих агрегатов до 30% обуславливает уменьшение ЭДС  $E_q$  в 1,9 раз и такое же уменьшение тока рабочего режима и уменьшение сверхпереходной ЭДС  $E_q''$  в 1,14 и такое же уменьшение тока КЗ при использовании метода симметричных составляющих в ВРК. Таким образом, квантиль тока порядка  $p_2$  рабочего и аварийного режимов можно определить разделив вычисленные с помощью ВРК без учета разгрузки агрегатов значения на 1,9 и 1,14 соответственно. Программа сделает это автоматически. Если необходимости в данном приведении нет, данные коэффициенты на форме (рисунок 4.13) задаются равными единице.
3. Вероятность излишнего действия рассчитываемой защиты при действии равновременной предыдущей. Данная вероятность исходя из равновероятности излишнего действия рассматриваемой ступени и действия равновременной ступени предыдущих линий, принята 0,5. При необходимости, она также может быть скорректирована.

**Задание параметров расчета**

Кoeffициенты | **Статистические данные** | Кoeffициент небаланса нулевой последов.

**Вероятности КЗ**

|                                   |                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Вероятность однофазного КЗ        | Вероятность двухфазного КЗ          |
| <input type="text" value="0,7"/>  | <input type="text" value="0,1"/>    |
| Вероятность трехфазного КЗ        | Вероятность двухфазного КЗ на землю |
| <input type="text" value="0,05"/> | <input type="text" value="0,15"/>   |

**Другие данные**

Математическое ожидание времени между АР, лет

Рисунок 4.14 – Форма задания параметров расчета. Ввод статистических данных

Вторая вкладка (рисунок 4.15) – статистические данные – позволяет скорректировать вероятности отдельных видов КЗ и математического ожидания времени между асинхронными режимами на защищаемом элементе.

**Задание параметров расчета**

Кoeffициенты | Статистические данные | **Кoeffициент небаланса нулевой последов.**

**Определение коoeffициента небаланса нулевой последовательности**

Отношение  $\alpha = \frac{\text{Ток, А}}{\text{Номинальный ток ТТ, А}}$

|      |                                                |                                |            |                                   |
|------|------------------------------------------------|--------------------------------|------------|-----------------------------------|
| если | $\alpha \leq$                                  | <input type="text" value="1"/> | $k_{nb} =$ | <input type="text" value="0,03"/> |
| если | <input type="text" value="1"/> $< \alpha \leq$ | <input type="text" value="3"/> | $k_{nb} =$ | <input type="text" value="0,05"/> |
| если | $\alpha \geq$                                  | <input type="text" value="3"/> | $k_{nb} =$ | <input type="text" value="0,1"/>  |

Рисунок 4.15 – Форма задания параметров расчета. Определение коoeffициента небаланса нулевой последовательности

При активизации третьей вкладки (рисунок 4.15) пользователь может задать определение коэффициента небаланса нулевой последовательности.

#### **4.6 Выводы по главе**

1. Разработанная программная структура, пользовательский интерфейс, принципы хранения данных и доступа к ним обеспечивают высокую производительность на большинстве используемых в настоящее время персональных компьютерах и удобство работы для пользователя. Результаты расчета пользователю доступны практически мгновенно, за исключением режима построения графика технической эффективности (скорость расчета определяется шагом и диапазоном уставок).

2. Структура программного обеспечения, разработанная на основе объектно-ориентированной парадигмы программирования, обеспечивает гибкость управления и модификации. Реализация отдельных функций и алгоритмов программы в виде классов позволяет добавлять в программу алгоритмы расчета технической эффективности других видов РЗ и соответствующий программный инструментарий.

3. Возможность получения кривых технической эффективности релейной защиты в зависимости от уставки позволяет объективно оценить целесообразность использования рассчитываемой РЗ на данном объекте сетевой инфраструктуры, ее робастность и произвести оптимальную настройку, исходя из требований чувствительности и селективности.

4. В соответствии с вышеизложенным можно считать, что разработанная программа является инструментом для эффективного проектирования токовой защиты нулевой последовательности, ее исследования и разработки новых рекомендаций и методик на основе критерия технической эффективности и его составляющих.

## **ГЛАВА 5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УСТАВОК ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ**

Целью данной главы является апробация разработанного критерия технической эффективности и методики. В качестве объекта исследования выбрана ступенчатая токовая защита нулевой последовательности линии 500 кВ СГРЭС-2 – ПС Ильково (РЗ со стороны СГРЭС-2) Тюменской энергосистемы. Топология сети рассматриваемого электрического района включает в себя следующие элементы:

- предыдущая линия 500 кВ первой периферии – ПС Ильково – Луговая 500 кВ (РЗ со стороны ПС Ильково). Также к первой периферии отнесена предыдущая короткая линия 220 кВ ПС Ильково – КПП-3, отходящая от средней стороны автотрансформатора на ПС Ильково. Это связано с тем, что на данной линии (несмотря на большое сопротивление автотрансформатора ПС Ильково) также возможные излишние действия основных ступеней, которые необходимо учесть.

- линии второй периферии 500 кВ: ПС Луговая – Тюмень (РЗ со стороны ПС Луговая), ПС Луговая – Демьянская (РЗ со стороны Луговая).

Совмещенная схема замещения прямой, обратной и нулевой последовательности и схема электрических соединений рассчитываемого района представлены в приложении А.

Для расчетов электрических величин используются программы ТКЗ 3000 и Дакар, для непосредственной реализации критерия технической эффективности и методики – разработанная программа RPTEC.

### **5.1 Подготовка исходных данных**

Входными данными для проведения вероятностно-статистических расчетов являются величины по таблице 4.1. Их можно подразделить на шесть групп:

1. Квантили порядков  $p_1=0,9987$  и  $p_1=0,0013$  через рассчитываемую РЗ: токи нулевой последовательности при КЗ  $i_{0p1}, i_{0p2}$ ; фазные токи асинхронного режима (пересчет в небаланс нулевой последовательности программа осуществляет автоматически)  $i_{p1}^{ap}, i_{p2}^{ap}$ ; токи нулевой последовательности неполнофазного режима  $i_{0p1}^{нпф}, i_{0p2}^{нпф}$ ; броски токов намагничивания  $i_{0p1}^{нам}, i_{0p2}^{нам}$ ; токи эксплуатационного режима  $i_{p1}^э, i_{p2}^э$ . Аналогичные величины через РЗ предыдущих элементов первой периферии (индекс «п») и второй (индекс «п\_пп»):  $i_{0pp1}, i_{0pp2}, i_{0п_пп1}, i_{0п_пп2}$
2. Продольные  $z, z_п, z_{п_пп}$  и удельные  $z, z_{пуд}, z_{п_ппуд}$  сопротивления элементов.
3. Статистические данные: удельные параметры потоков повреждения  $\omega_{уд}, \omega_{пуд}, \omega_{п_ппуд}$ .
4. Математические ожидания времени: действия ступеней РЗ  $m(T^j), m(T_{п}^j), m(T_{п_пп}^j)$ ; существования неполнофазного режима  $m(T^{нпф})$ , асинхронного режима  $m(T^{ap})$ .
5. Величины токов КЗ в максимальном (индекс «а») и минимальном (индекс «и») по току режимов относительно рассчитываемой РЗ: токовые границы, характеризующие переход токов КЗ с одной линии на последующую  $i_{0па}^{пред}, i_{0пи}^{пред}, i_{0п_ппа}^{пред}, i_{0п_ппи}^{пред}$ ; коэффициенты токораспределения  $k_{ап}, k_{ип}, k_{ап_пп}, k_{ип_пп}$ ; токи для задания линейно-кусочной функции распределения тока КЗ вдоль линии по характерным точкам КЗ в начале (индекс «н»), в середине (индекс «с»), в конце (индекс «к») линии  $i_{0пна}, i_{0пка}, i_{0пни}, i_{0пки}, i_{0п_ппна}, i_{0п_ппка}, i_{0п_ппни}, i_{0п_ппки}$

6. Уставки каналов предыдущих РЗ, с которыми рассматривается взаимодействие рассчитываемой ступени:  $i_{0п}^{I,II,III,IV}, i_{0п\_пп}^{IV}$  .

Для получения величин по п.1 на основе метода СГИД исходные данные (токи или мощности нагрузочных, генераторных узлов и др.) должны быть заданы соответствующими квантилями.

Как правило, для расчета токов КЗ в проектных и обслуживающих РЗ организациях используются вычислительно-расчетные и программно-технические комплексы, такие как АРМ СРЗА, ТКЗ 3000, Евростаг, ВМК РВ ЭЭС и др. Руководствуясь правилами электротехники и методом симметричных составляющих (используемым в ВРК) [96], можно дать следующие рекомендации для определения данных величин по методу СГИД посредством указанных ВРК:

1. Для вычисления максимального наблюдаемого тока (квантиля порядка  $p1=0,9987$ ) необходимо обеспечить следующие условия:

- КЗ в начале линии;
- вид КЗ, обеспечивающий максимальную величину тока КЗ и соответствующий назначению защиты (однофазное или двухфазное КЗ на землю);
- максимальный реально-возможный режим загрузки источников в отправной части сети и минимальный в приемной;
- коммутационное состояние сети, соответствующее максимальному току через РЗ: включение подпитывающих элементов в отправной части схемы и отключение обходных, шунтирующих связей, предыдущих элементов: линий, энергоблоков, генераторов, трансформаторов с заземленной нейтралью, включая автотрансформаторы. При этом взаимоиндуктирующие с рассчитываемой линии должны быть также заземлены с обеих сторон, чтобы в замкнутом контуре циркулировал наведенный взаимоиндукцией ток, создающий магнитное поле, уменьшающее

магнитное поле взаимноиндуктивно связанных ветвей (линий), что приводит к уменьшению их индуктивного сопротивления нулевой последовательности и, как следствие, к увеличению тока.

- устройства РПН трансформаторов (автотрансформаторов) должны быть в положении, обуславливающем минимально-возможное проходное сопротивление в отправной части схемы и максимальное в приемной;

2. Для определения минимального наблюдаемого тока (квантиля порядка  $p_1=0,0013$ ) необходимо обеспечить следующие условия:

- КЗ в конце линии;
- вид КЗ, обеспечивающий минимальную величину тока КЗ и соответствующий назначению защиты (однофазное или двухфазное КЗ на землю);
- минимальный реально-возможный режим загрузки источников в отправной части сети и максимальный в приемной;
- коммутационное состояние сети, соответствующее минимальному току через РЗ: отключение подпитывающих элементов в отправной части схемы и включение обходных, шунтирующих связей относительно защищаемой линии, включение предыдущих питающих линий, энергоблоков, генераторов, трансформаторов с заземленной нейтралью, включая автотрансформаторы;
- устройства РПН трансформаторов (автотрансформаторов) должны быть в положении, обуславливающем максимально возможное проходное сопротивление в отправной части схемы и минимальное в приемной.

Руководствуясь данными рекомендациями, подготовлены исходные данные по рассчитываемому объекту помощью ТКЗ 3000, Дакар-99 (таблица 5.1), а также уставки релейных защит (таблица 5.2). Данные в таблицы сгруппированы по разделам.

Таблица 5.1 – Исходные данные по по линии СГРЭС-2 – ПС Ильково

| Повреждение линии                                                                                         |                      | Асинхронный режим                                                                                |                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| $i_{0p1}, \text{ A}$                                                                                      | 54048                | $i_{p1}^{\text{ap}}, \text{ A}$                                                                  | 2162                       |
| $i_{0p2}, \text{ A}$                                                                                      | 1203                 | $i_{p2}^{\text{ap}}, \text{ A}$                                                                  | 1454                       |
| $m(T^I), \text{ c}$<br>$m(T^{II}), \text{ c}$<br>$m(T^{III}), \text{ c}$                                  | 0,05<br>0,55<br>1,05 | $m(T^{\text{алар}}), \text{ c}$                                                                  | 0,55                       |
| $z, \text{ Ом}$                                                                                           | 125,58               |                                                                                                  |                            |
| $z_{\text{уд}}, \text{ Ом/км}$                                                                            | 0,308                |                                                                                                  |                            |
| $\omega_{\text{уд}}, 1/(\text{год} \cdot 100\text{км})$                                                   | 0,88                 |                                                                                                  |                            |
| Неполнофазный режим                                                                                       |                      | Эксплуатационный режим                                                                           |                            |
| $i_{0p1}^{\text{нпф}}, \text{ A}$                                                                         | 1496                 | $i_{p1}^3, \text{ A}$                                                                            | 500                        |
| $i_{0p2}^{\text{нпф}}, \text{ A}$                                                                         | 208                  | $i_{p2}^3, \text{ A}$                                                                            | 300                        |
| $m(T^{\text{нпф}}), \text{ c}$                                                                            | 0,55                 |                                                                                                  |                            |
| Повреждение на предыдущих линиях первой периферии                                                         |                      |                                                                                                  |                            |
| ПС Ильково – Луговая 500 кВ                                                                               |                      |                                                                                                  |                            |
| $i_{0pr1}, \text{ A}$                                                                                     | 3535                 | $i_{0па}^{\text{пред}}, \text{ A}$                                                               | 3272                       |
| $i_{0pr2}, \text{ A}$                                                                                     | 570                  | $i_{0пи}^{\text{пред}}, \text{ A}$                                                               | 3088                       |
| $m_{\text{п}}(T^I), \text{ c}$<br>$m_{\text{п}}(T^{II}), \text{ c}$<br>$m_{\text{п}}(T^{III}), \text{ c}$ | 0,05<br>0,55<br>1,05 | $K_{\text{ап}}$                                                                                  | 0,454                      |
| $z, \text{ Ом}$                                                                                           | 190,35               | $K_{\text{ип}}$                                                                                  | 0,414                      |
| $z_{\text{уд}}, \text{ Ом/км}$                                                                            | 0,308                |                                                                                                  |                            |
| $\omega_{\text{уд}}, 1/(\text{год} \cdot 100\text{км})$                                                   | 0,88                 | $i_{0пна}, \text{ A}$<br>$i_{0пка}, \text{ A}$<br>$i_{0пни}, \text{ A}$<br>$i_{0пки}, \text{ A}$ | 3272<br>752<br>3424<br>763 |

| ПС Ильково – КГП-3 220 кВ                                    |                      |                     |       |
|--------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|-------|
| $i_{0пр1}, A$                                                | 5823                 | $i_{0па}^{пред}, A$ | 2503  |
| $i_{0пр2}, A$                                                | 1351                 | $i_{0пи}^{пред}, A$ | 5091  |
| $m_{п}(T^I), c$<br>$m_{п}(T^{II}), c$<br>$m_{п}(T^{III}), c$ | 0,05<br>0,55<br>1,05 | $K_{ап}$            | 0,503 |
| $z, Ом$                                                      | 9,29                 | $K_{ип}$            | 0,259 |
| $z_{уд}, Ом/км$                                              | 0,435                |                     |       |
| $\omega_{уд}, 1/(год*100км)$                                 | 1,4                  | $i_{0пна}, A$       | 2503  |
|                                                              |                      | $i_{0пка}, A$       | 1351  |
|                                                              |                      | $i_{0пни}, A$       | 5091  |
|                                                              |                      | $i_{0пки}, A$       | 1879  |
| Повреждение на предыдущих линиях второй периферии            |                      |                     |       |
| ПС Луговая – Тюмень 500 кВ                                   |                      |                     |       |
| $i_{0пр1}, A$                                                | 6319                 | $i_{0па}^{пред}, A$ | 977   |
| $i_{0пр2}, A$                                                | 490                  | $i_{0пи}^{пред}, A$ | 6298  |
| $m_{п}(T^{IV}), c$                                           |                      | $K_{ап}$            | 0,963 |
| $z, Ом$                                                      | 105,1                | $K_{ип}$            | 0,067 |
| $z_{уд}, Ом/км$                                              | 0,308                |                     |       |
| $\omega_{уд}, 1/(год*100км)$                                 | 0,88                 | $i_{0пна}, A$       | 977   |
|                                                              |                      | $i_{0пка}, A$       | 407   |
|                                                              |                      | $i_{0пни}, A$       | 6298  |
|                                                              |                      | $i_{0пки}, A$       | 877   |
| ПС Луговая – Демьянская 500 кВ                               |                      |                     |       |
| $i_{0пр1}, A$                                                | 5240                 | $i_{0па}^{пред}, A$ | 926   |
| $i_{0пр2}, A$                                                | 960                  | $i_{0пи}^{пред}, A$ | 5202  |
| $m_{п}(T^{IV}), c$                                           |                      | $K_{ап}$            | 0,967 |
| $z, Ом$                                                      | 45,65                | $K_{ип}$            | 0,062 |
| $z_{уд}, Ом/км$                                              | 0,308                |                     |       |
| $\omega_{уд}, 1/(год*100км)$                                 | 0,88                 | $i_{0пна}, A$       | 926   |
|                                                              |                      | $i_{0пка}, A$       | 476   |
|                                                              |                      | $i_{0пни}, A$       | 5202  |
|                                                              |                      | $i_{0пки}, A$       | 1487  |

Таблица 5.2 – Выбранные по руководящим указаниям [7] уставки

| Уставка                                                                                | Величина уставки, А                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Рассчитываемая ТЗНП со стороны СГРЭС-2 линии 500 кВ СГРЭС-2 – ПС Ильково               |                                                                                            |
| Уставка первой ступени                                                                 | $i_0^I = 2292$                                                                             |
| Уставка второй ступени не определена (не выполняется требование чувствительности)      | -                                                                                          |
| Уставка третьей ступени                                                                | $i_0^{III} = 896$                                                                          |
| Уставка четвертой (резервирующей) ступени                                              | $i_0^{IV} = 127$                                                                           |
| ТЗНП линии первой периферии 500 кВ ПС Ильково – Луговая со стороны Ильково             |                                                                                            |
| Уставка первой ступени                                                                 | $i_{0п1}^I = 2292$                                                                         |
| Уставка второй ступени                                                                 | $i_{0п1}^{II} = 1619$                                                                      |
| Уставка третьей ступени                                                                | $i_{0п1}^{III} = 896$                                                                      |
| Уставка четвертой (резервирующей) ступени                                              | $i_{0п1}^{IV} = 100$                                                                       |
| ТЗНП линии первой периферии 220 кВ ПС Ильково – КГП-3 со стороны Ильково               |                                                                                            |
| Уставка первой ступени                                                                 | $i_{0п2}^I = 2790$                                                                         |
| Уставка второй ступени                                                                 | $i_{0п2}^{II} = 1342$                                                                      |
| Уставка третьей ступени                                                                | $i_{0п2}^{III} = 730$                                                                      |
| Уставка четвертой (резервирующей) ступени                                              | $i_{0п2}^{IV} = 168$                                                                       |
| ТЗНП линии второй периферии 500 кВ ПС Луговая – Тюмень со стороны Луговая              |                                                                                            |
| Уставка четвертой (резервирующей) ступени                                              | $i_{0п1\_пн1}^{IV} = 147$                                                                  |
| ТЗНП линии второй периферии 500 кВ ПС Луговая – Демьянская со стороны Луговая          |                                                                                            |
| Уставка четвертой (резервирующей) ступени                                              | $i_{0п1\_пн2}^{IV} = 124$                                                                  |
| Математические ожидания времени действия основных ступеней для всех указанных РЗ равны | $m(T^I) = 0,05 \text{ с}$<br>$m(T^{II}) = 0,55 \text{ с}$<br>$m(T^{III}) = 1,05 \text{ с}$ |

Приведенные данные введены в программу (см. рисунки 4.5÷4.8).

## **5.2 Расчеты и анализ технической эффективности основных ступеней**

Как следует из приведенной таблицы 5.2, по руководящему методу выполнен расчет всех каналов РЗ. При этом для второй ступени рассчитываемой линии уставка не выбрана, т.к. не удовлетворено требование чувствительности. Согласно ЭРМ, вторая ступень в этом случае должна быть выведена из действия. Однако она может быть оставлена в работе с обоснованием по критерию технической эффективности.

Проблема выбора уставки второй ступени обусловлена отмеченными в первой главе сложностями: случайным характером параметра реагирования РЗ и невозможностью для всех режимов (от маловероятного минимального до маловероятного максимального) обеспечить выполнение требований чувствительности и селективности.

Проведем анализ технической эффективности полученных по ЭРМ уставок первой и третьей ступени, а для второй ступени выберем уставку по критерию технической эффективности.

Графики технической эффективности для первой и третьей ступени анализируемой РЗ приведены на рисунках 5.1, 5.2.

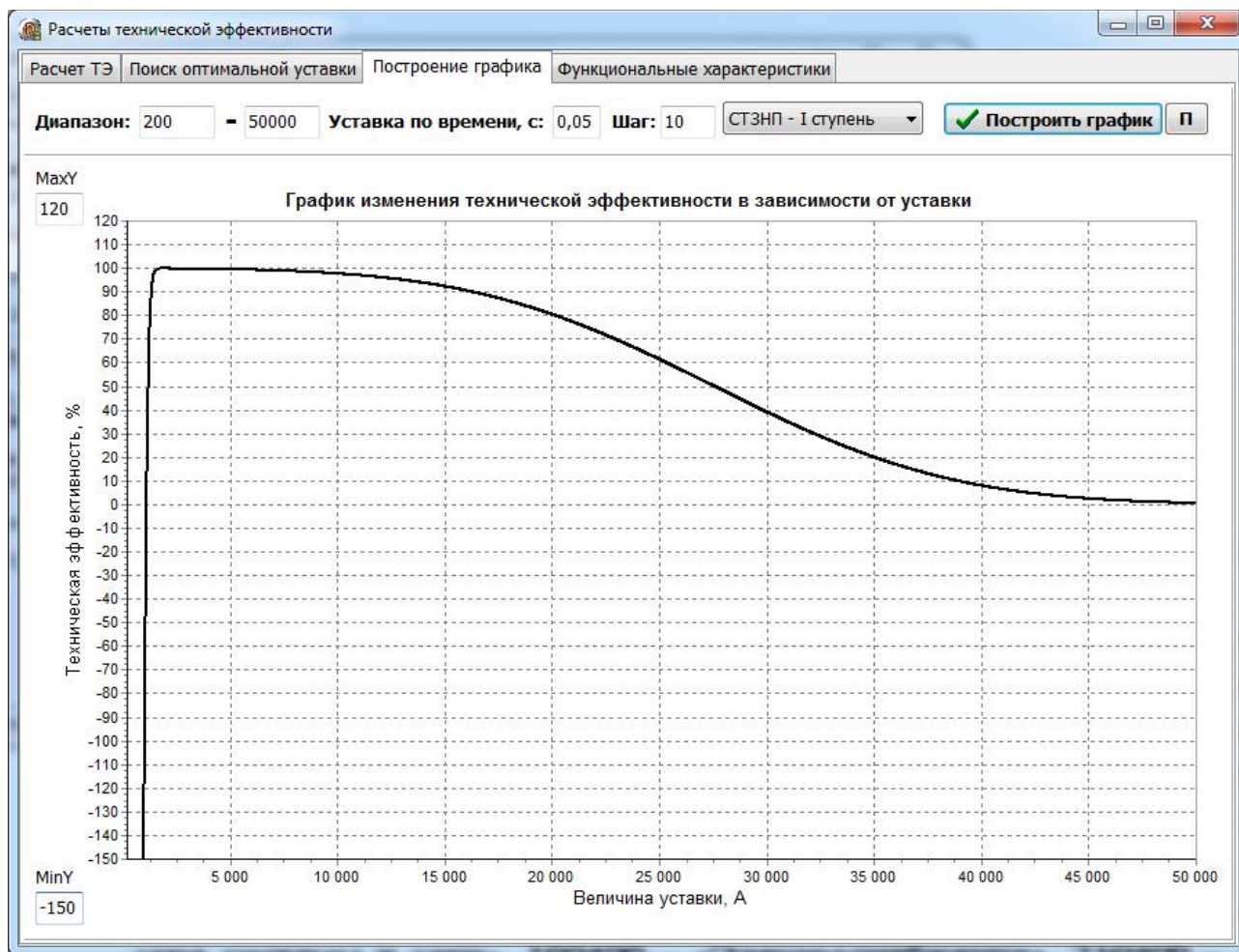


Рисунок 5.1 – График технической эффективности первой ступени

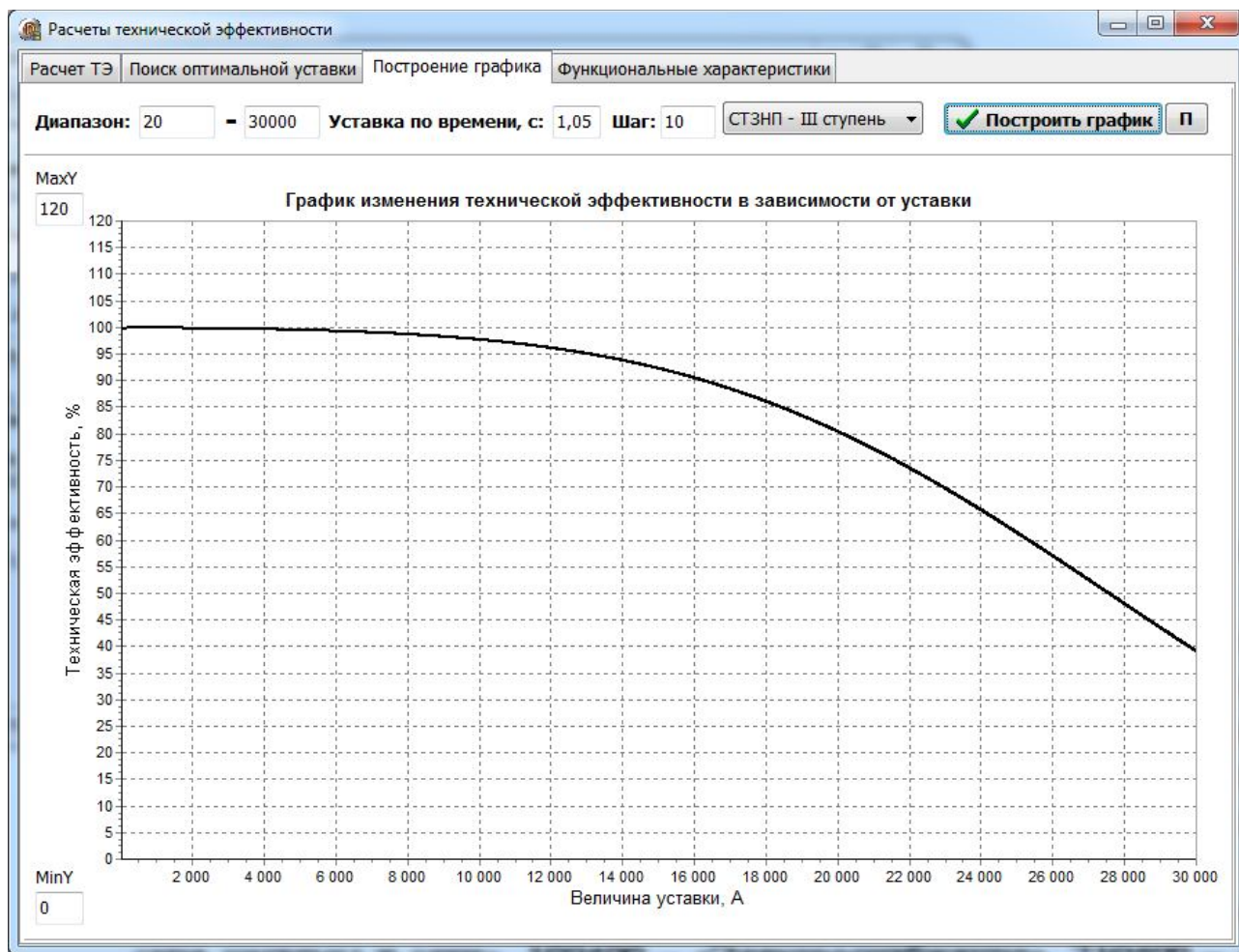


Рисунок 5.2 – График технической эффективности третьей ступени

Как следует из графиков, области оптимальной настройки первой и третьей ступени (вдоль которой эффективность близка к 100 %) лежат соответственно в диапазонах (900; 6000) А и (100; 1900) А. Наличие данных областей обусловлено возможностью отстроиться от помех рабочих режимов и токов КЗ предыдущих линий без ущерба для чувствительности. Это возможно в том случае, если плотности распределения вероятностей токов КЗ защищаемого элемента и остальных величин разнесены в пространстве. Убедимся в этом по следующим рисункам (рисунки 5.3÷5.10), на которых приведены подробные отчеты по расчетам технической эффективности данных ступеней, ее составляющих и соответствующие ПРВ.

Показатели технической эффективности первой ступени, настроенной по ЭРМ:

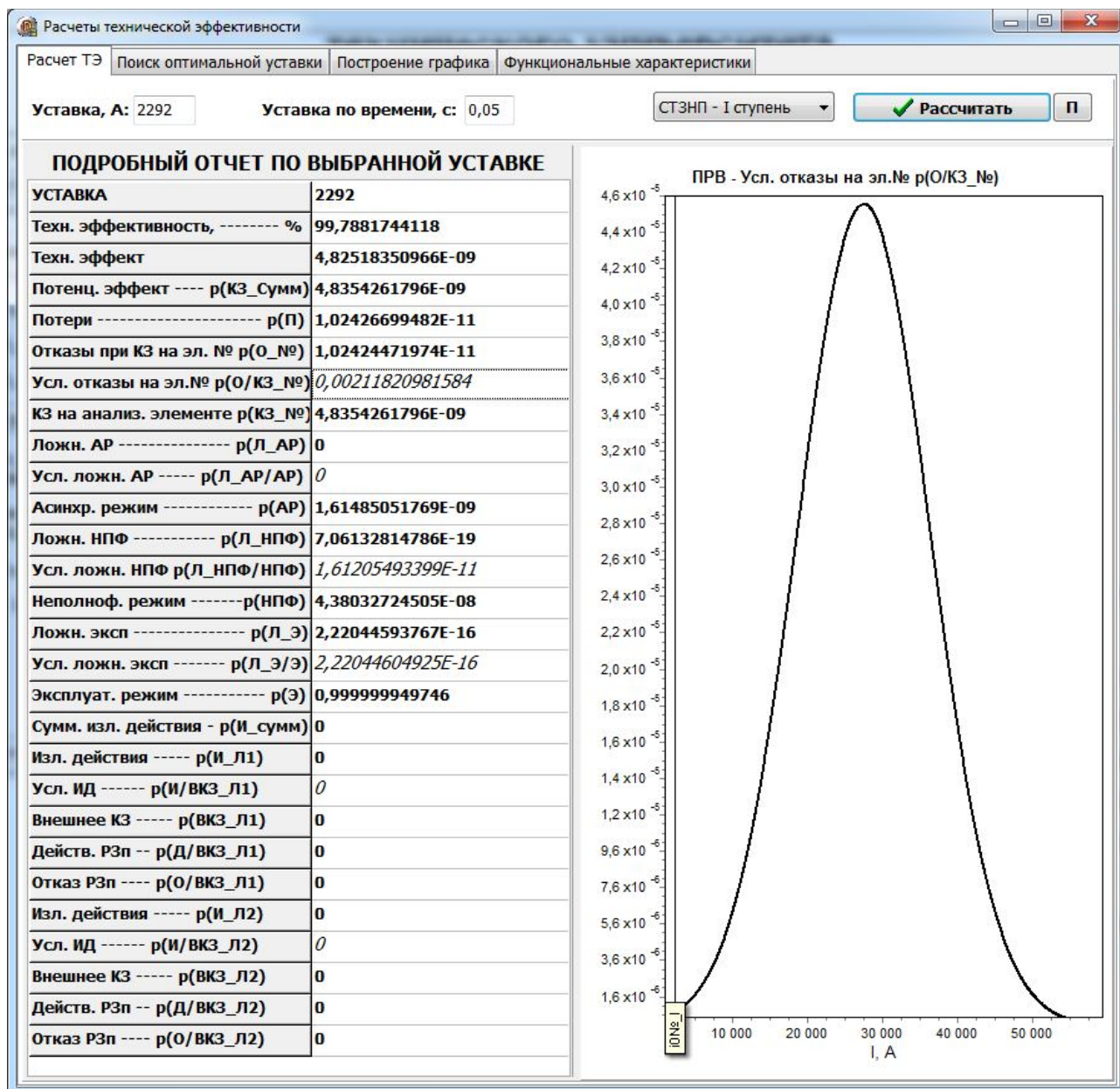


Рисунок 5.3 – Отчет по расчету технической эффективности для первой ступени. Плотность распределения вероятностей токов нулевой последовательности при КЗ на линии (к вычислению условной вероятности отказов при КЗ на линии). На оси абсцисс графика обозначена уставка первой ступени  $i0№\_I - i_0^I$

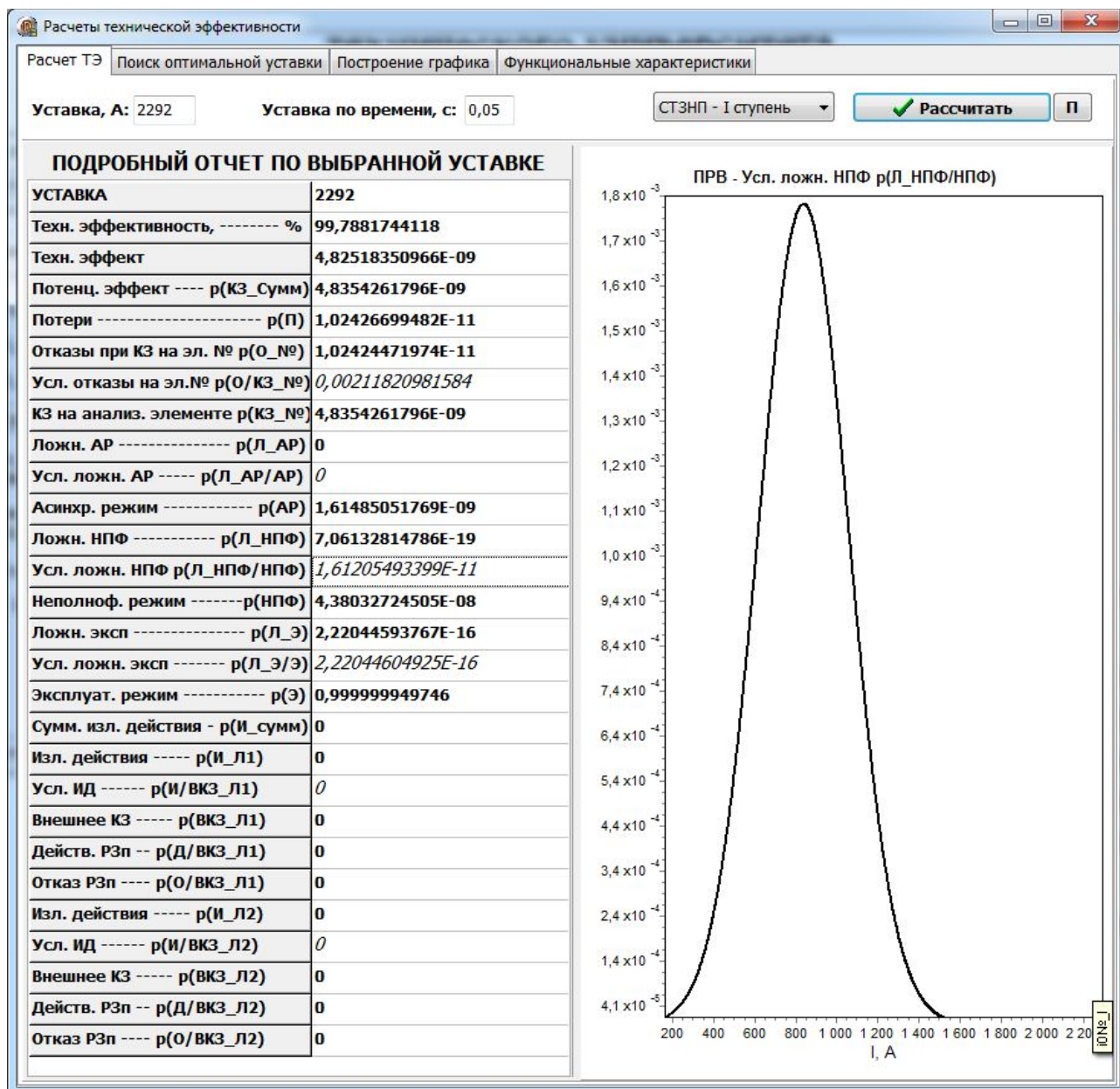


Рисунок 5.4 –Плотность распределения вероятностей токов нулевой последовательности неполнофазного режима (к вычислению условной вероятности ложных действий I ступени в неполнофазном режиме)

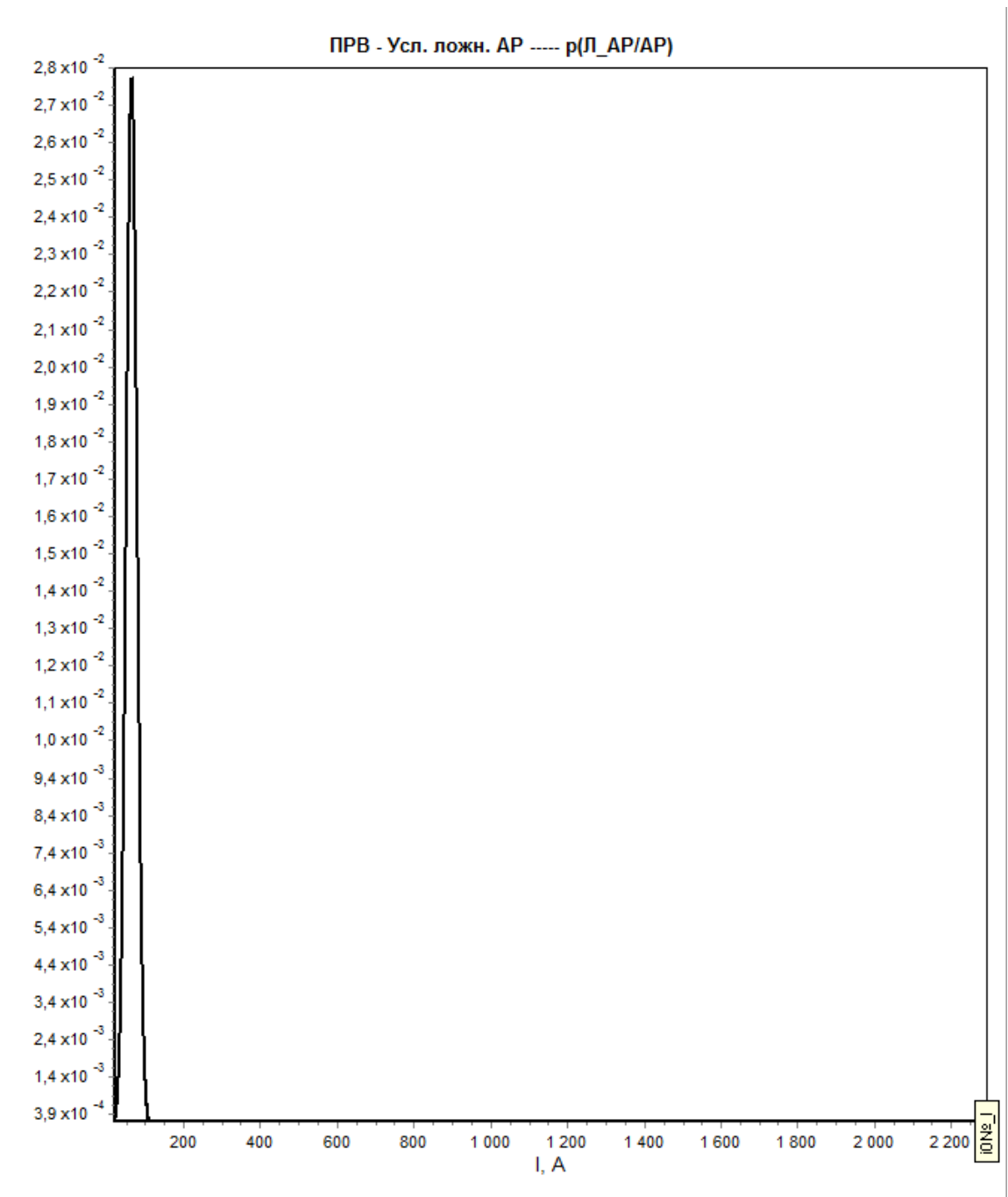


Рисунок 5.5 –Плотность распределения вероятностей небаланса нулевой последовательности при асинхронном режиме (к вычислению условной вероятности ложных действий I ступени в асинхронном режиме)

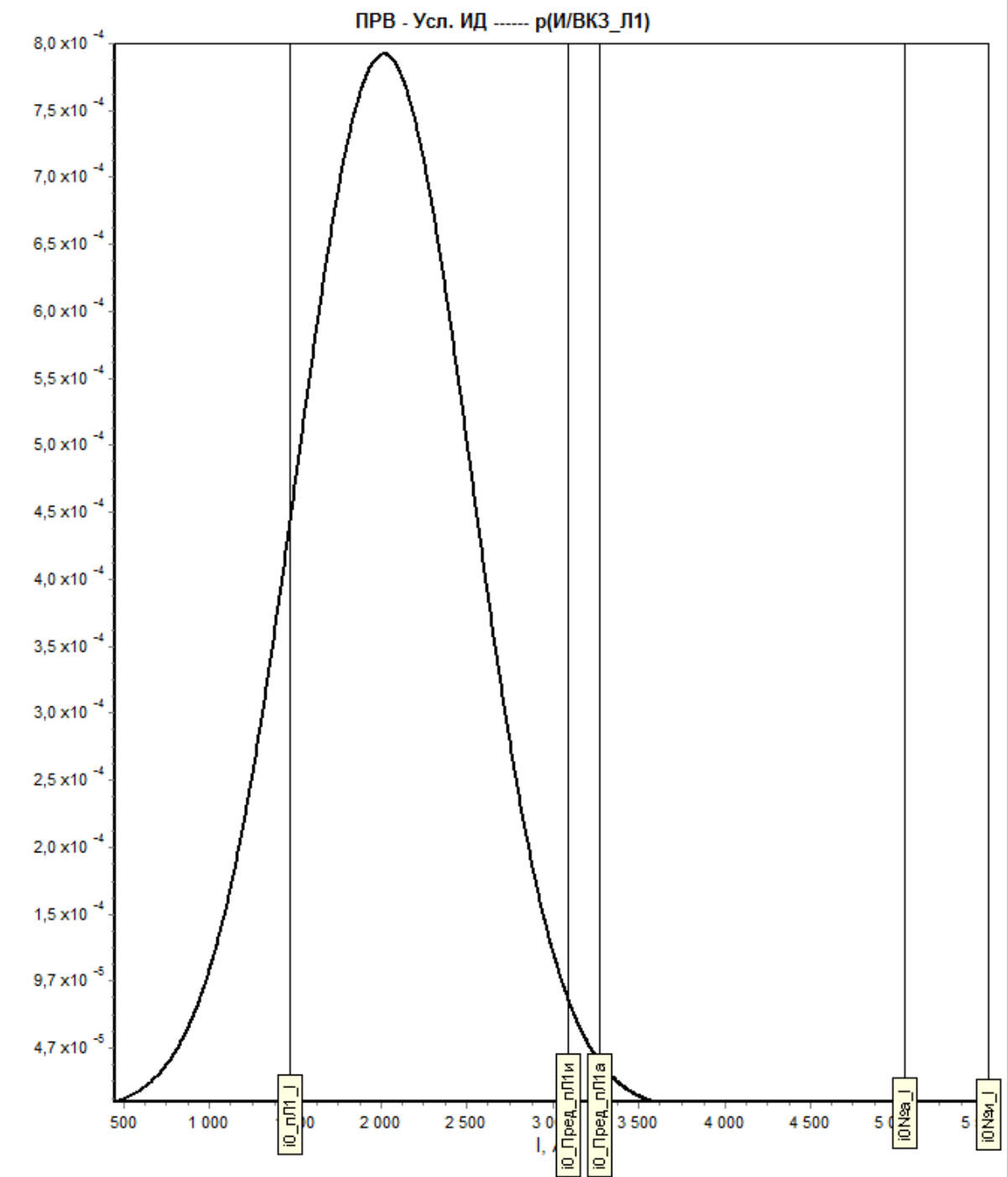


Рисунок 5.6 –Плотность распределения вероятностей токов нулевой последовательности при КЗ на предыдущей линии ПС Ильково - Луговая (к вычислению условной вероятности излишних действий I ступени).

Соответствие обозначений:  $i0\_пл1\_I - i_{0п1}^I$ ,  $i0\_Пред\_пл1а - i_{0п1а}^{пред}$ ,  $i0\_Пред\_пл1и -$

$$i_{0п1и}^{пред}, i0N2а\_I - \frac{i_0^I}{K_{ап}}, i0N2и\_I - \frac{i_0^I}{K_{ип}}$$

Вычисленные в соответствии с рисунками 5.4-5.6 условные вероятности отказов в срабатывании, ложных и излишних действий первой ступени сведем в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Рассчитанные условные вероятности первой ступени, настроенной по ЭРМ

|                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| $p(O^I / KЗ^I)$                | 0,00211820981584               |
| $p(L^{apI} / AP)$              | 0                              |
| $p(L^{нпфI} / НПФ)$            | $1,61205493399 \cdot 10^{-11}$ |
| $p(L^{\exists I} / \exists^I)$ | $2,22044604925 \cdot 10^{-16}$ |
| $p(I_{п}^I / BK_{п}^I)$        | 0                              |

Вероятности ложных действий в асинхронном режиме и в эксплуатационном режиме равны нулю, т.к. небаланс нулевой последовательности в этих режимах несущественен. Вероятность излишних действий равна нулю, что непосредственно следует из рисунка 5.7 (приведенные к токам предыдущей РЗ уставки рассматриваемой первой ступени в максимальном и минимальном режиме являются более грубыми по сравнению с уставкой первой ступени предыдущей РЗ и превышают границы  $i_{0п1а}^{пред}$  и  $i_{0п1и}^{пред}$ ).

Показатели технической эффективности третьей ступени:

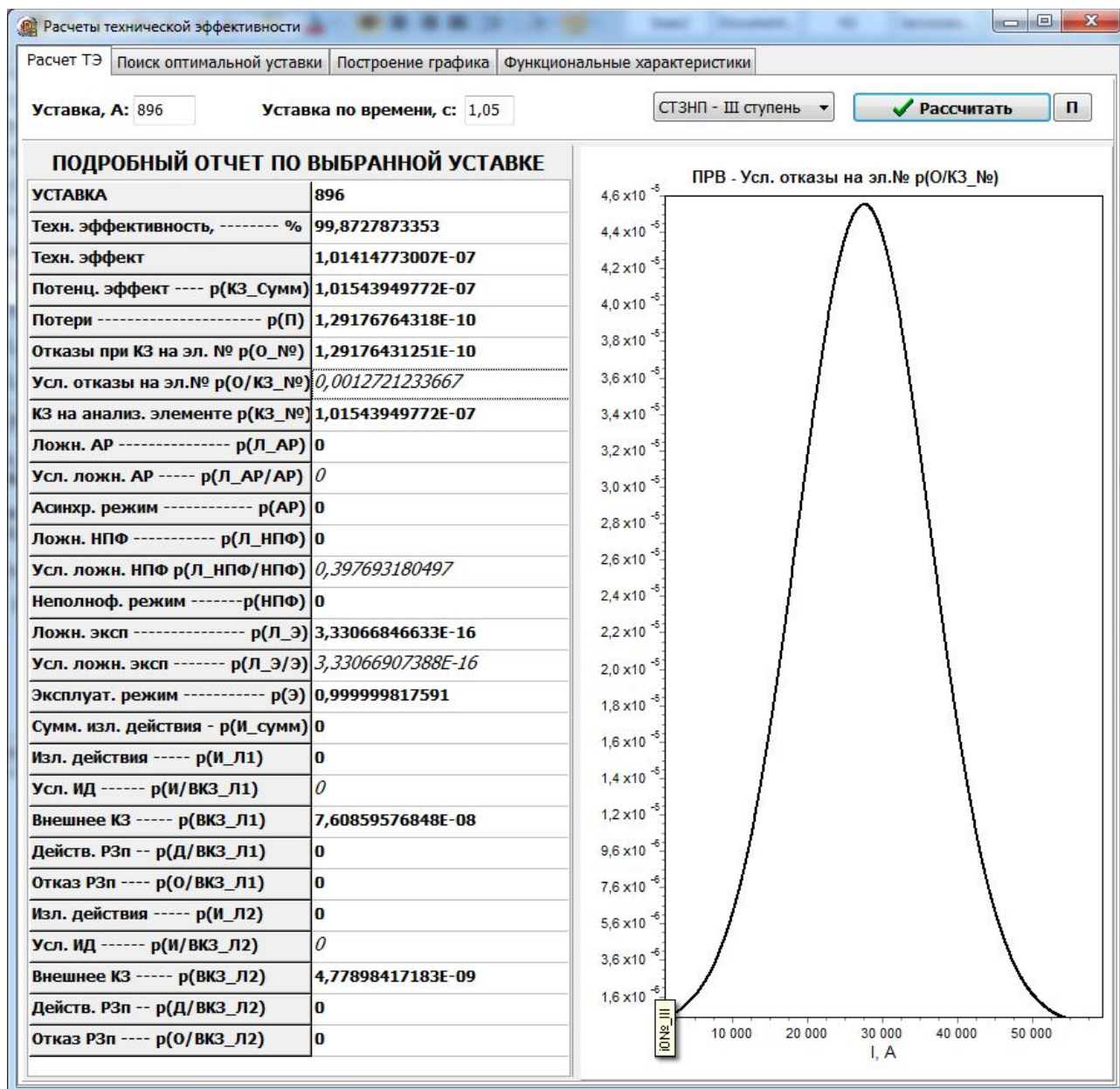


Рисунок 5.7 – Отчет по расчету технической эффективности для третьей ступени. Плотность распределения вероятностей токов нулевой последовательности при КЗ на линии (к вычислению условной вероятности отказов III ступени). На оси абсцисс графика обозначена уставка первой ступени  $i0_{\text{№ III}} - i_0^{\text{III}}$

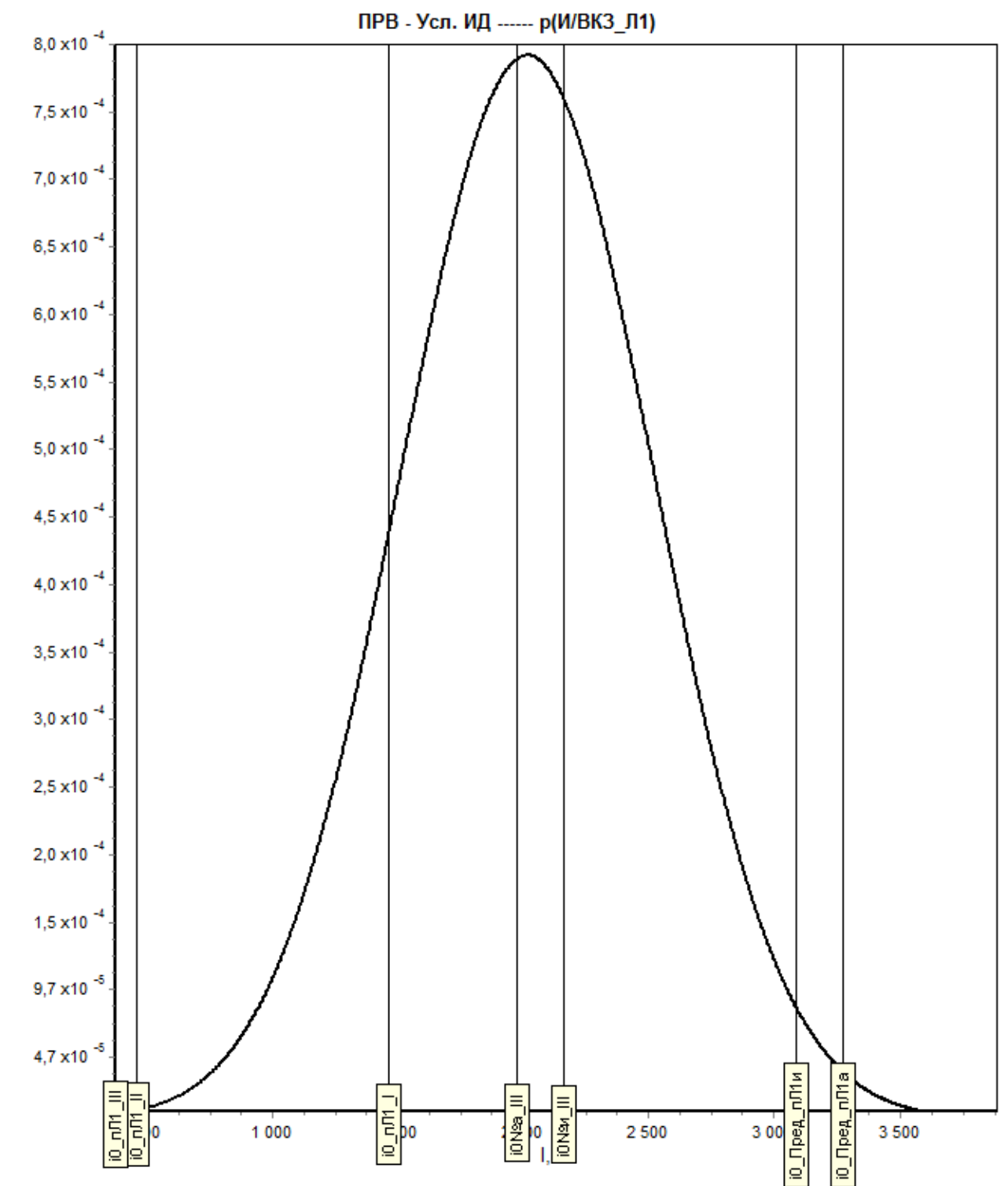


Рисунок 5.8 –Плотность распределения вероятностей токов нулевой последовательности при КЗ на предыдущей линии (к вычислению условной вероятности излишних действий III ступени). Соответствие обозначений:

$$i0\_пл1\_III - i_{0пл}^{III}, i0\_пл1\_II - i_{0пл}^{II}, i0\_на\_III - \frac{i_0^{III}}{K_{ап}}, i0\_на\_II - \frac{i_0^{III}}{K_{ип}}$$

Вычисленные в соответствии с рисунками 5.8-5.9 условные вероятности отказов в срабатывании, ложных и излишних действий третьей ступени сведем в таблицу 5.4.

Таблица 5.4 – Рассчитанные условные вероятности третьей ступени, настроенной по ЭРМ

|                               |                                |
|-------------------------------|--------------------------------|
| $p(O^{III}/KЗ^{III})$         | 0,0012721233667                |
| $p(L^{apIII}/AP)$             | 0                              |
| $p(L^{нпфIII}/НПФ)$           | 0,397693180497                 |
| $p(L^{эIII}/Э^{III})$         | $3,33066907388 \cdot 10^{-16}$ |
| $p(I_{п}^{III}/BK_{п}^{III})$ | 0                              |

Как следует из таблиц 5.3-5.4, третья ступень по сравнению с первой ступенью имеет меньшую вероятность отказов, т.к. обладает меньшей уставкой. Условная вероятность ложных действий в неполнофазном режиме имеет большую величину по сравнению с первой ступенью, однако данная вероятность не оказывает влияние на величину технического эффекта в связи с тем, что безусловная вероятность ложных действий в данном режиме равна нулю (т.к. третья ступень отстроена от неполнофазного режима по времени действия). Излишние действия третьей ступени отсутствуют, т.к. область ее возможных излишних действий в соответствии с рисунком 5.9 перекрывается более быстродействующими ступенями предыдущего комплекта РЗ.

Определим уставки первой и третьей ступени по критерию технической эффективности (рисунки 5.9, 5.10).

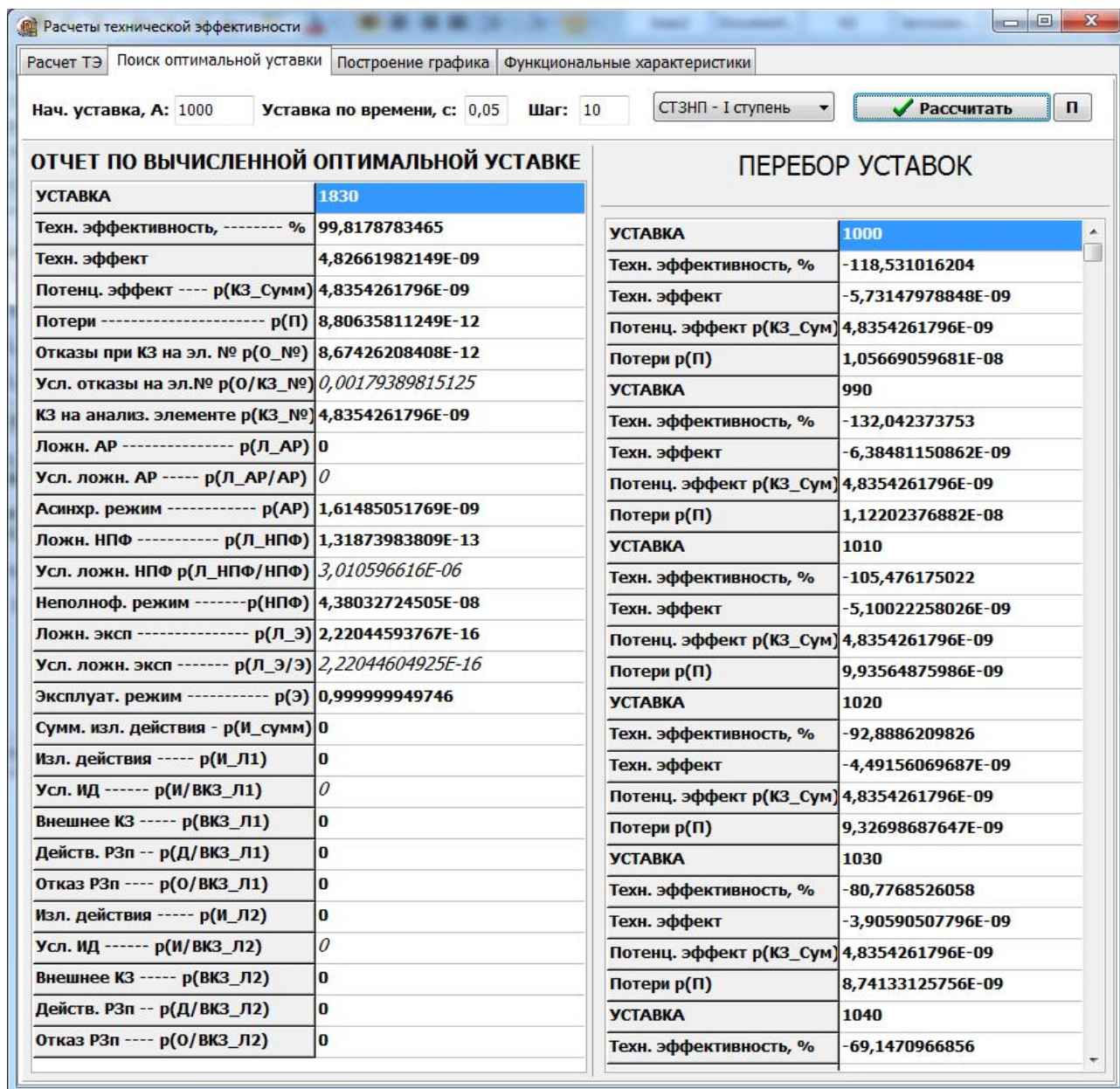


Рисунок 5.9 – Вычисление оптимальной уставки первой ступени по критерию технической эффективности

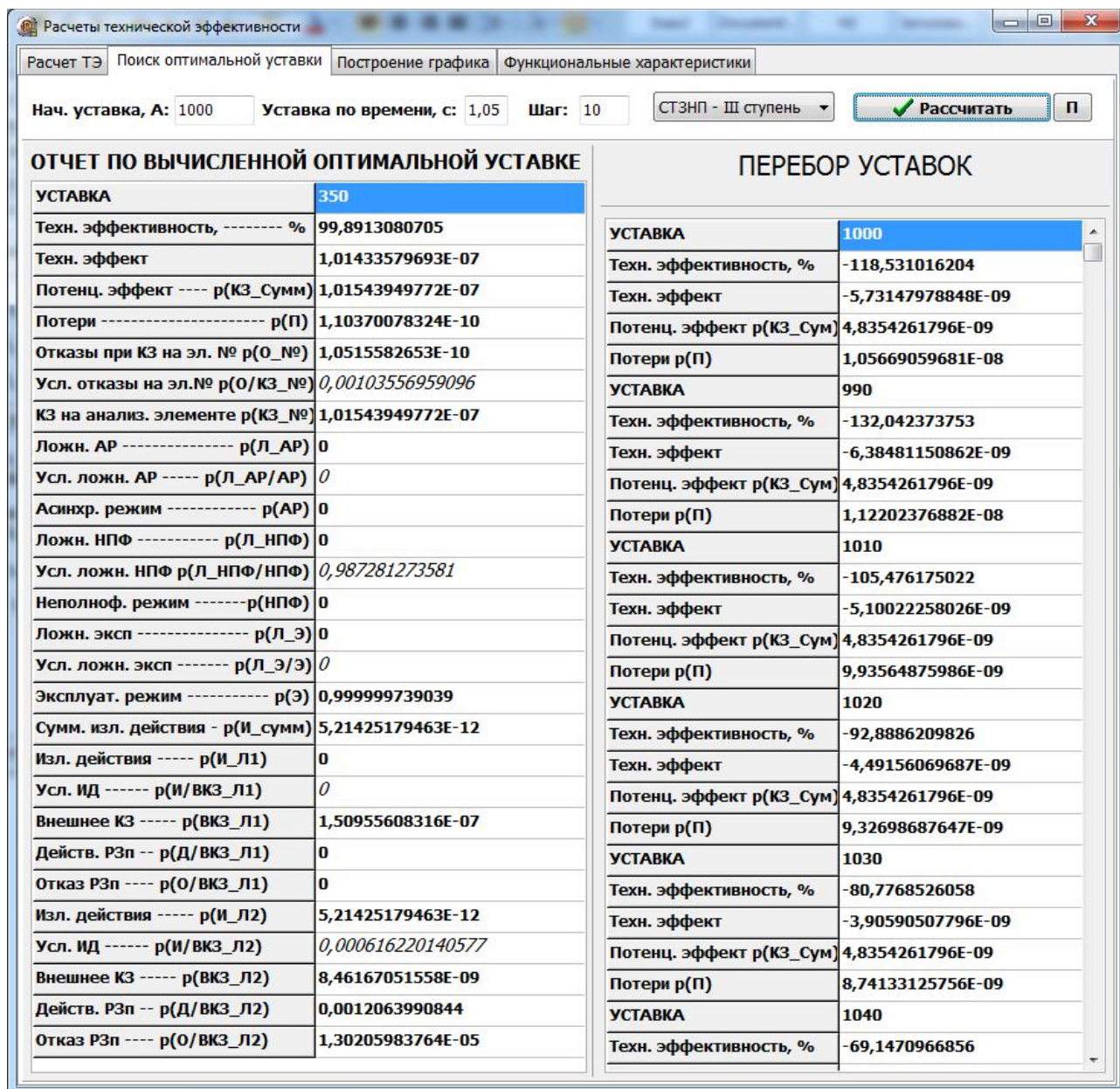


Рисунок 5.10 – Вычисление оптимальной уставки третьей ступени по критерию технической эффективности

Сравним полученные уставки (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Уставки I и III ступени, полученные разными методами

| № ступени | Величина<br>уставки,<br>А | Способ получения<br>уставки           | Техническая<br>эффективность | Чувствительность к<br>КЗ в конце линии* |
|-----------|---------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| I         | 2292                      | ЭРМ                                   | 99,7881744118                | $\frac{1203}{2292} = 0,52$              |
| I         | 1830                      | Критерий технической<br>эффективности | 99,8178783465                | $\frac{1203}{2292} = 0,65$              |
| III       | 896                       | ЭРМ                                   | 99,8727873353                | $\frac{1203}{2292} = 1,34$              |
| III       | 360                       | Критерий технической<br>эффективности | 99,8913080705                | $\frac{1203}{2292} = 3,34$              |

*\*Коэффициент чувствительности во всех случаях определен как отношение минимального тока КЗ в конце линии (по величине равному  $i_{0p2}$ ) к уставке. Согласно ЭРМ, для первой ступени коэффициент чувствительности определяется при КЗ в начале линии. Это обусловлено расчетными выражениями выбора уставки по условию отстройки от тока КЗ в конце линии. Однако для уставки первой ступени, выбранной по критерию технической эффективности, чувствительность может быть проверена при КЗ в конце линии. Для сравнения, коэффициенты чувствительности при КЗ в начале линии для уставок, выбранных по ЭРМ и технической эффективности, соответственно равны  $\frac{30677}{2292} = 13,38$  и  $\frac{30677}{1830} = 16,76$ .*

Как следует из таблицы 5.5, выбранные уставки первой и второй ступени по ЭРМ и критерию технической эффективности обладают сравнимыми показателями технической эффективности, но лучшей чувствительностью обладают уставки выбранные исходя из максимума эффективности. Таким образом, в данном случае каналы РЗ, настроенные по ЭРМ, отличаются лучшей селективностью, а каналы РЗ, настроенные по максимуму технической эффективности – лучшей чувствительностью.

Проанализируем вторую ступень РЗ, которую не удалось настроить по ЭРМ. График технической эффективности и расчет оптимальной уставки приведены соответственно на рисунках 5.11-5.12.

Как следует из графика технической эффективности (рисунок 5.11), наилучшие уставки находятся в диапазоне от 1600 до 1800 А. Заметим, что по сравнению с первой и третьей ступенью, которые в соответствии с терминологией главы 4 являются естественно-адаптированными к сетевой

инфраструктуре, данный канал РЗ является слабо-адаптированным (подвержен случайным помехам, проблематичен для согласования и отстройки), т.к. область эффективной настройки весьма небольшая. По этой причине возникли сложности с настройкой второй ступени по экспертно-руководящему методу, который целесообразен к применению при большом диапазоне наилучших уставок.

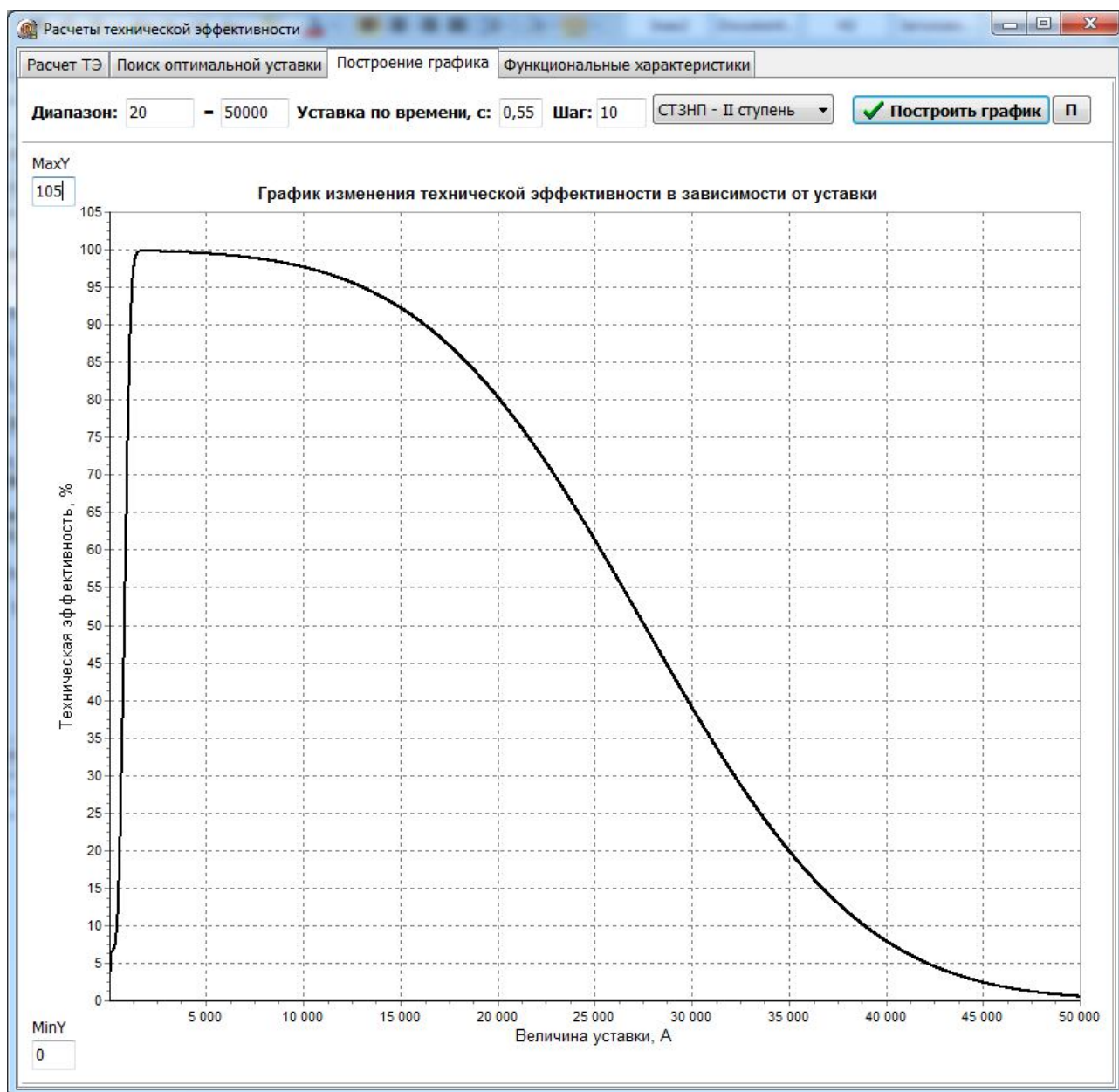


Рисунок 5.11 – График технической эффективности второй ступени

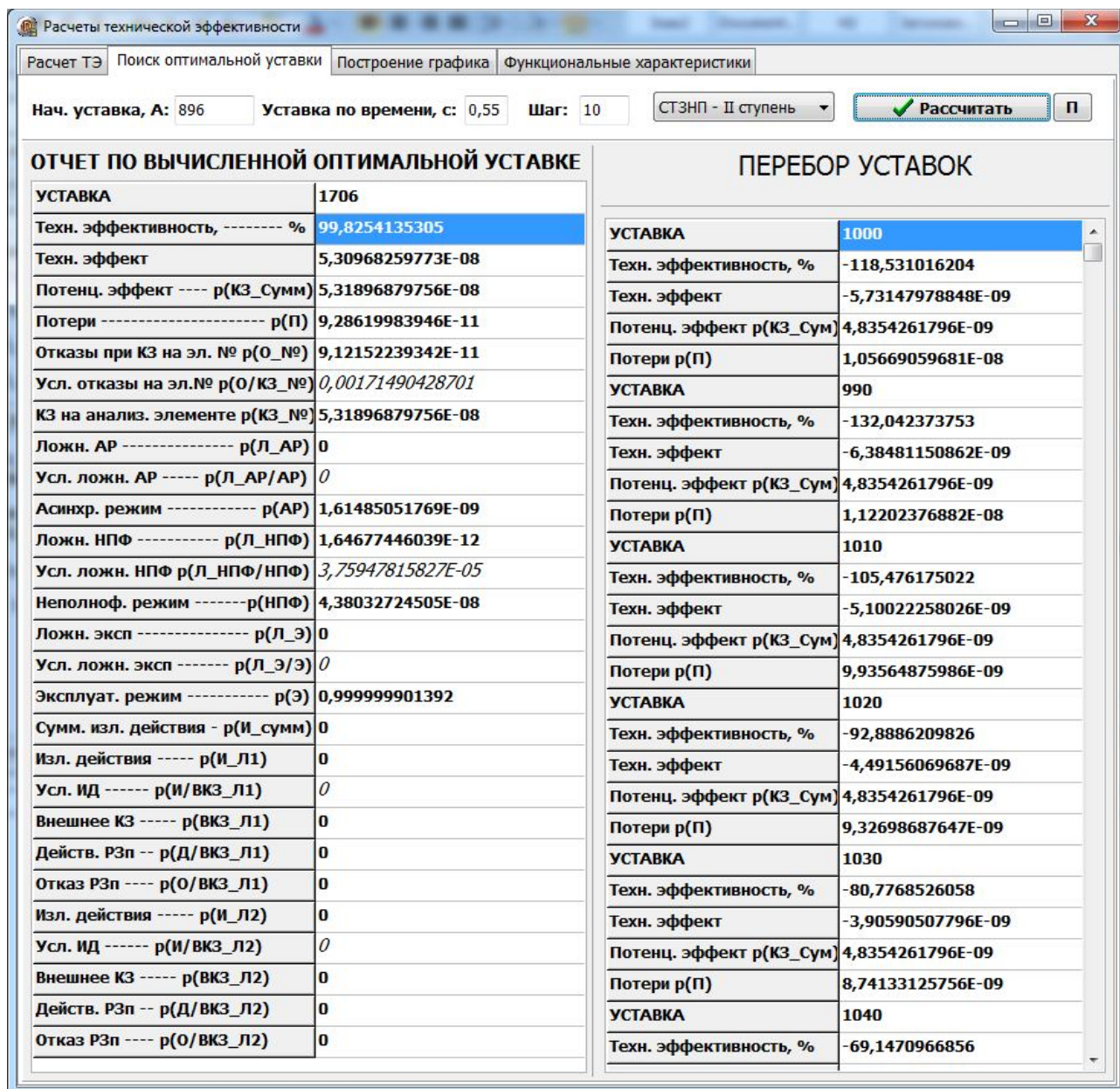


Рисунок 5.12 – Вычисление оптимальной уставки второй ступени по критерию технической эффективности

Оптимальной величиной уставки второй ступени, обеспечивающей минимум вероятности потерь, является в соответствии с рисунком 5.12 – 1706

А. Коэффициент чувствительности для данной уставки 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), 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 %.

Условная вероятность отказов для данной уставки равна 0,00171490428701. Уменьшение уставки от оптимальной приведет к повышению чувствительности и уменьшению вероятности отказов, но увеличится вероятность излишних и ложных действий. Для примера, приведем показатели эффективности для уставки второй ступени 1500 А и 1000 А (рисунок 5.13 и таблица 5.6).

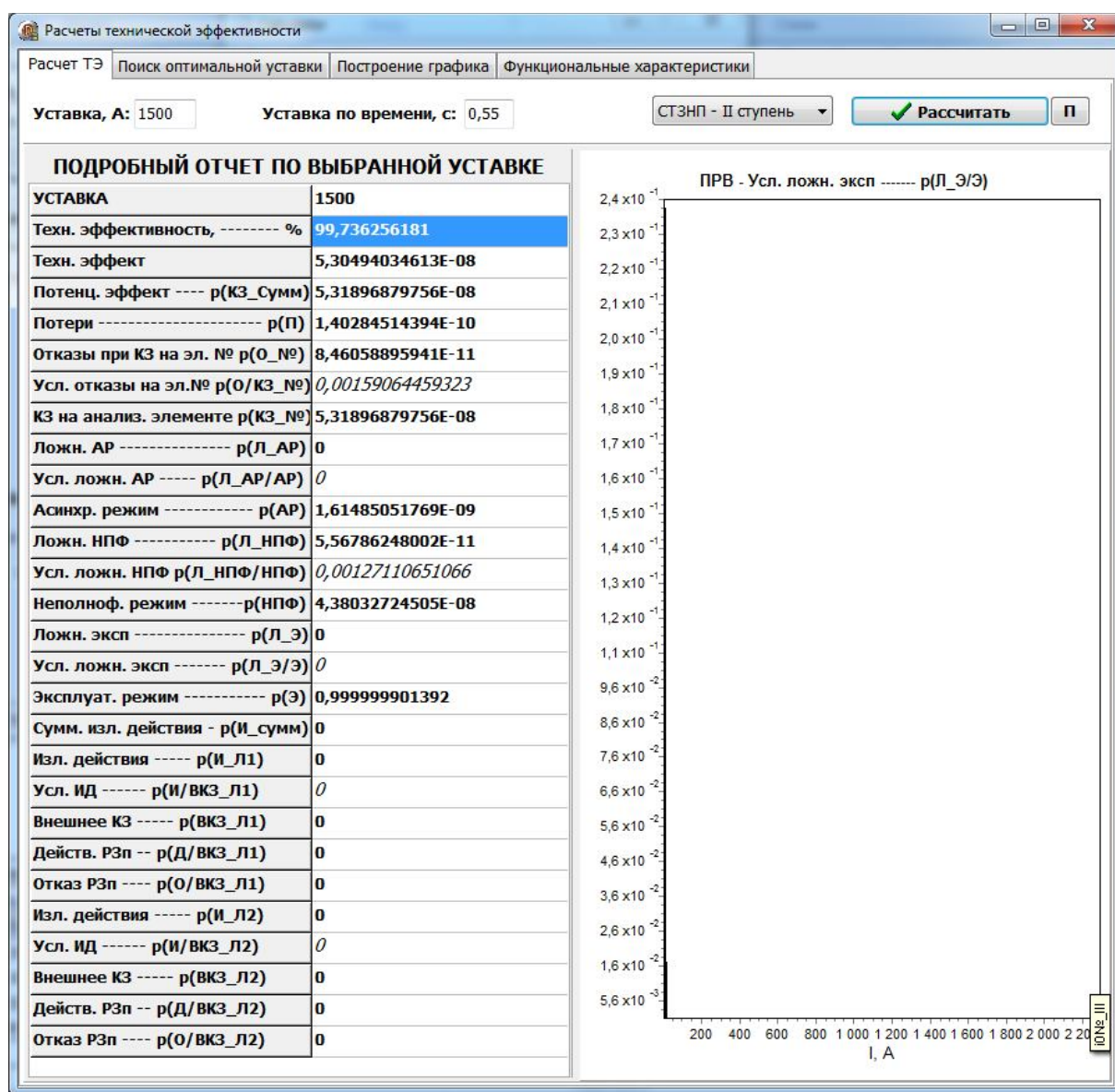


Рисунок 5.13 – Вычисление технической эффективности для уставки II ступени 1500 А

Таблица 5.6 – Оценка различных уставок II ступени

| № ст. | Величина уставки, А   | Техническая эффективность | $p(O^{II}/K3^{II})$ | $p(L^{нпфII}/НПФ)$            | $p(I^{II})$                    |
|-------|-----------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| II    | 1706<br>(оптимальная) | 99,8254135305             | 0,00171490428701    | $3,75947815827 \cdot 10^{-5}$ | 0                              |
| II    | 1500                  | 99,736256181              | 0,00159064459323    | 0,00127110651066              | 0                              |
| II    | 1000                  | 80,7519227846             | 0,00132243163033    | 0,231360618198                | $3,33002931804 \cdot 10^{-11}$ |

Как было отмечено в третьем варианте предлагаемой методики настройки РЗ (3 глава), дополнительно техническую эффективность второй ступени можно повысить, установив на всех линиях в качестве основной защиты от всех видов КЗ РЗ с обменом высокочастотными сигналами между комплектами, установленными на концах линии [82] и отказавшись от первой ступени ТЗНП. В нашем случае, дополнительного эффекта от этого мероприятия мы не получим, т.к. излишние действия здесь не играют определяющей роли: снизить уставку второй ступени мешают помехи в эксплуатационных и аномальных режимах, особенно в неполнофазном (см. таблицу 5.6 и рис. 5.12-5.13).

### **5.3 Расчеты и анализ технической эффективности резервирующей ступени**

График технической эффективности резервирующей ступени приведен на рисунке 5.14.

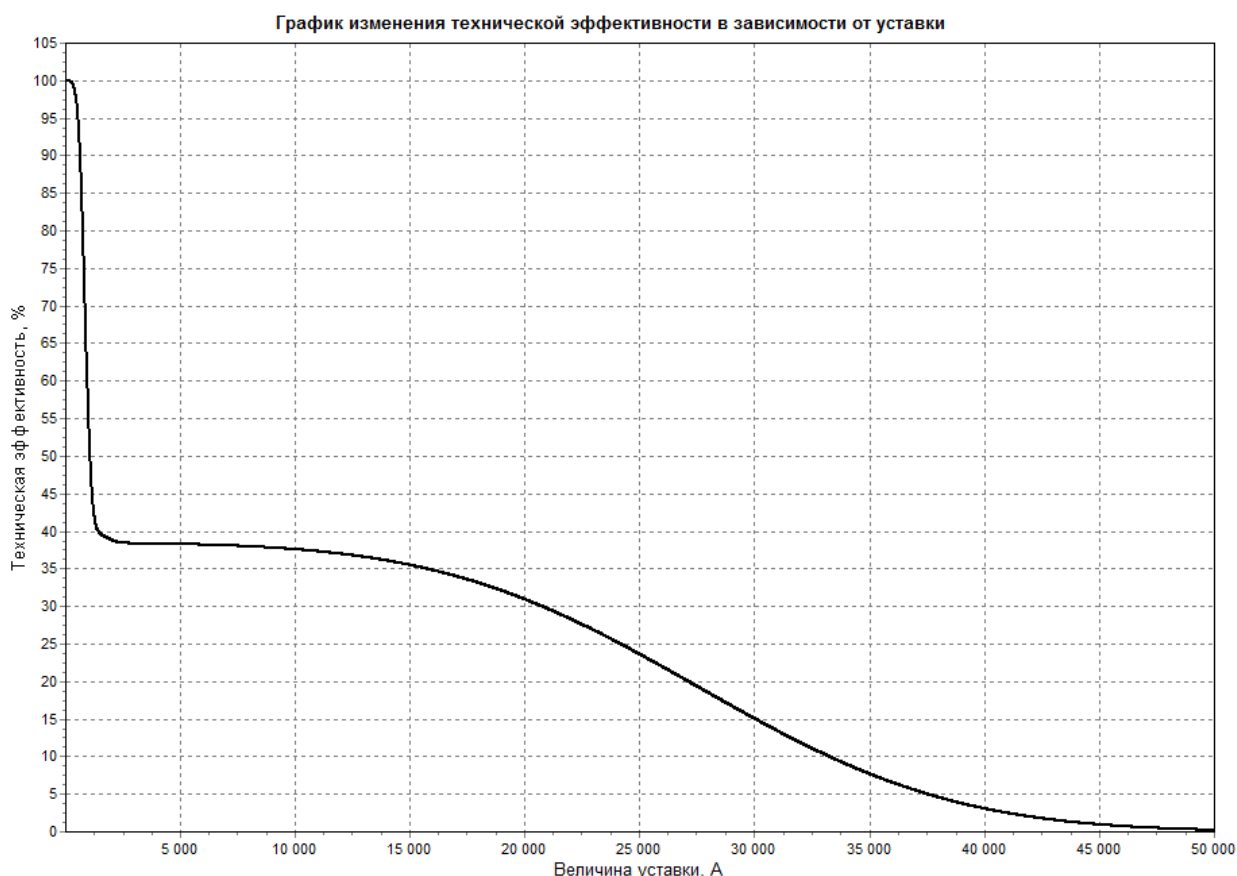


Рисунок 5.14 – График технической эффективности четвертой ступени

Характер графика объясняется следующими обстоятельствами. В качестве отказов четвертой ступени рассматриваются отказы не только на основном защищаемом элементе (линия СГРЭС-2 – ПС Ильково), но и на линиях, отнесенных к первой периферии (ПС Ильково – Луговая, ПС Ильково – КПП-3), защиты которых данная ступень должна резервировать. Соответственно, уставка четвертой ступени должна быть чувствительна к КЗ на линиях первой периферии. При недостаточной чувствительности появляются отказы в срабатывании, которые приводят к снижению эффективности.

Показатели технической эффективности для уставки выбранной по ЭРМ приведены далее.

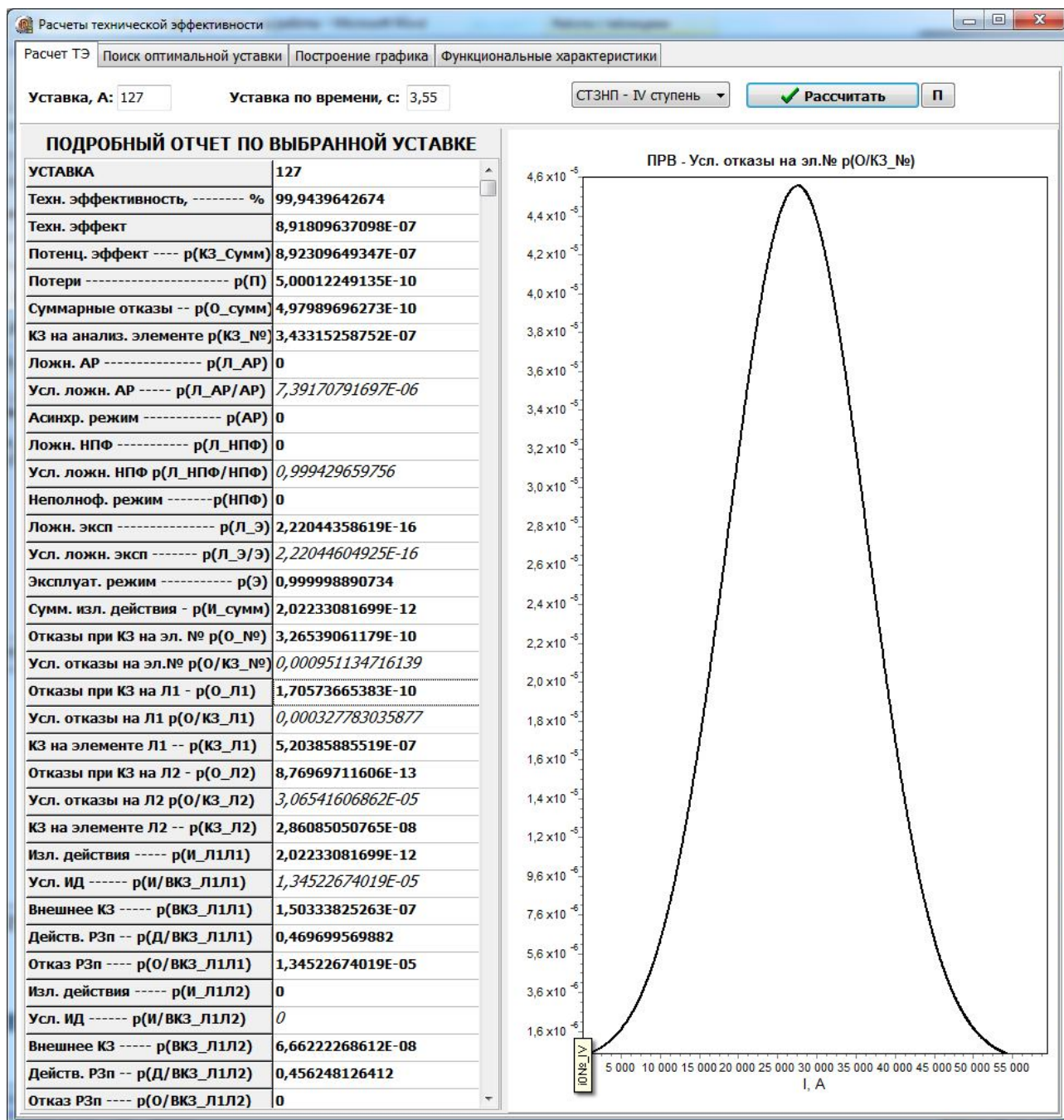
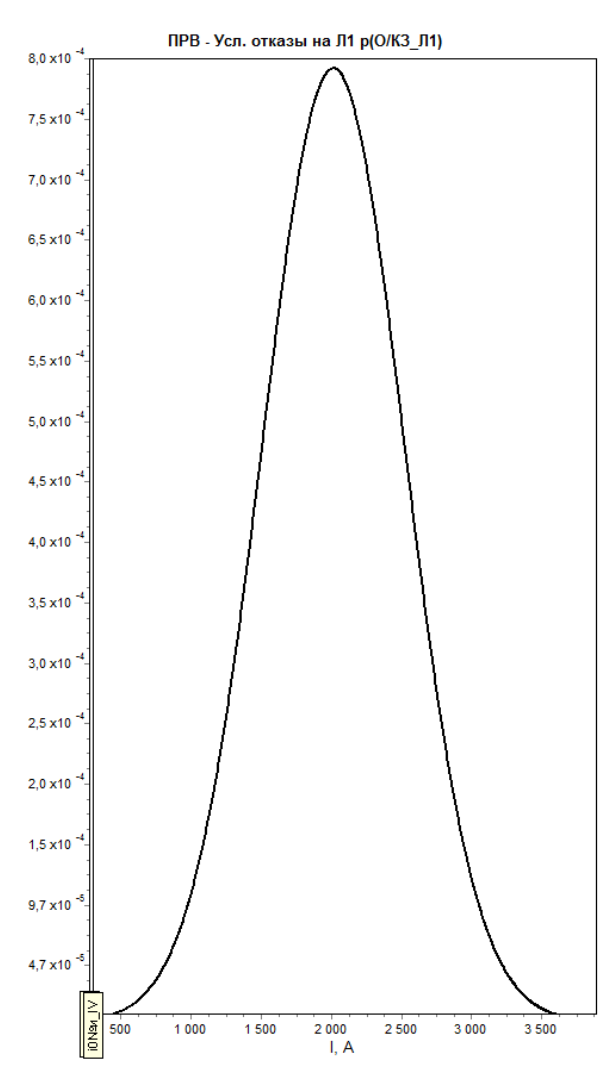
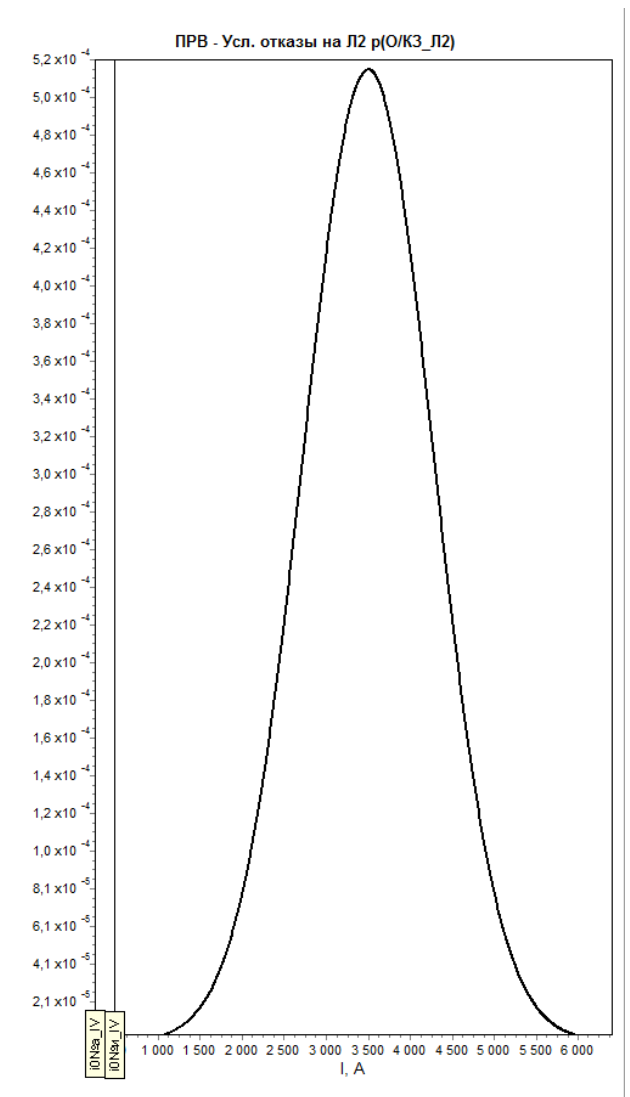


Рисунок 5.15 – Отчет по расчету технической эффективности для четвертой степени. Плотность распределения вероятностей токов нулевой последовательности при КЗ на автоматизируемой линии (к вычислению условной вероятности отказов при КЗ на линии). На оси абсцисс графика обозначена уставка четвертой степени  $i_0 \text{ № IV} - i_0^{\text{IV}}$



**а**



**б**

Рисунок 5.16 – Плотность распределения вероятностей токов нулевой последовательности при КЗ на линии: а - ПС Ильково – Луговая (далее обозначается как «Л1»), б - ПС Ильково – КГП-3 (далее обозначается как «Л2»). Иллюстрируют вычисление отказов в срабатывании резервирующей ступени при КЗ на Л1 и Л2. Уставки на оси абсцисс (ось токов нулевой последовательности) приведены в координаты токов КЗ соответствующей линии. Соответствия обозначений:

$$i0N_{за\_IV} = \frac{i_0^{IV}}{K_{ап\_пп}}, \quad i0N_{и\_IV} = \frac{i_0^{IV}}{K_{ип\_пп}}$$

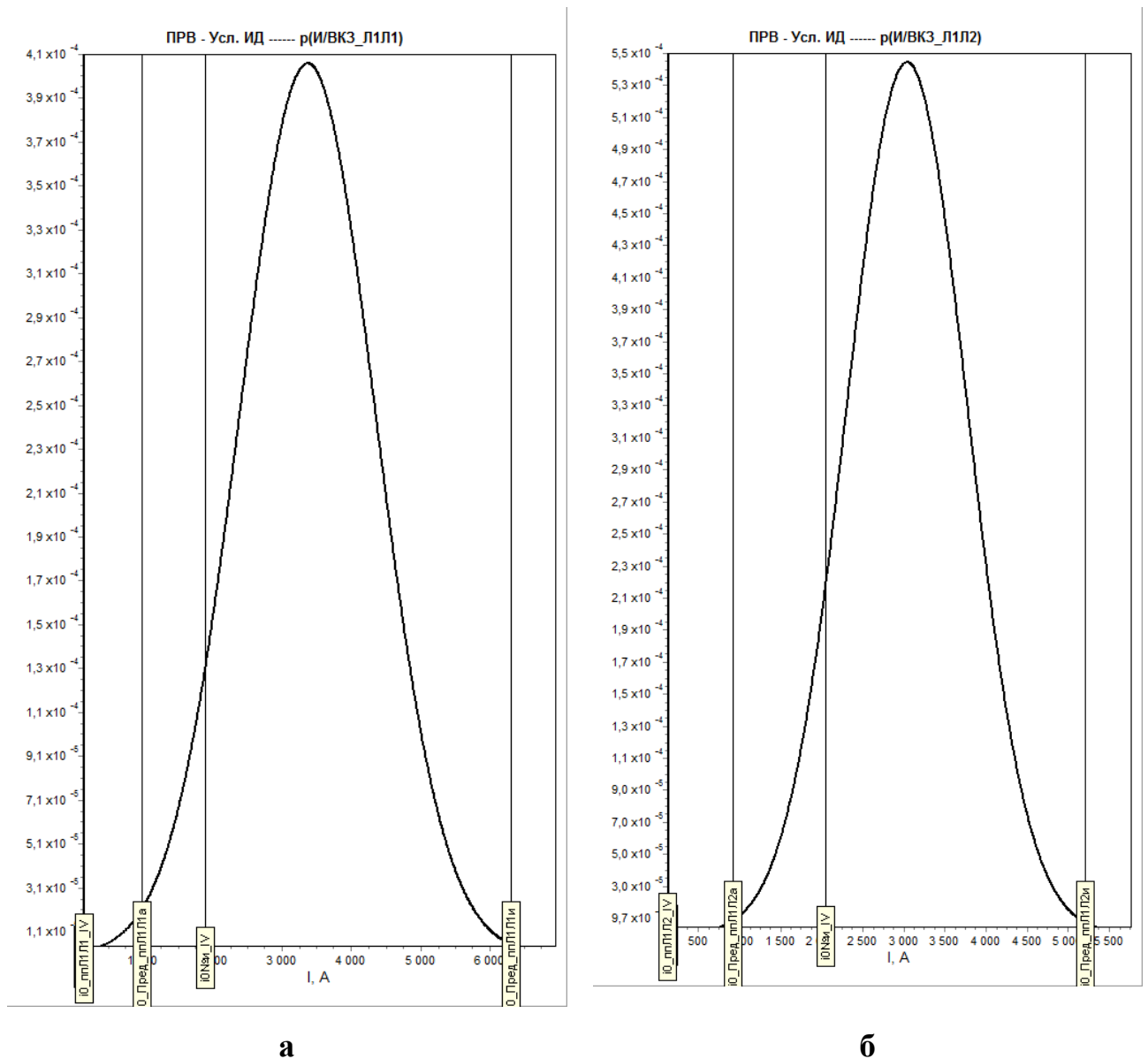


Рисунок 5.17 – Плотность распределения вероятностей токов нулевой последовательности при КЗ на линиях второй периферии (к вычислению соответствующих условных вероятностей излишних действий IV ступени): а - ПС Луговая – Тюмень (далее обозначается как «Л1Л1»); б - ПС Луговая – Демьянская (далее обозначается как «Л1Л2»). Соответствие обозначений:  $i0\_ппл1л1\_IV - i_{0п1\_пп1}^{IV}$ ,  $i0\_Пред\_ппЛ1Л1а - i_{0п1\_пп1а}^{пред}$ ,  $i0\_Пред\_ппЛ1Л1и - i_{0п1\_пп1и}^{пред}$ ,

$$i0_{Нв\_IV} - \frac{i_0^I}{K_{ан}}, i0_{Нв\_I} - \frac{i_0^I}{K_{ин}}$$

Область наилучшей настройки, определяемая по рисунку 5.14, находится в диапазоне уставок от 20 до 200 А. Далее в интервале от 200 до 1200 наблюдается спад, обусловленный появлением отказов при КЗ на линиях первой периферии (рисунок 5.16) и основной защищаемой (рисунок 5.15). Ложных действий в неполнофазном и асинхронном режиме данная ступень не имеет, т.к. отстроена от них по времени. Как следует из рисунка 5.17, излишние действия имеют место при КЗ на линии Л1Л1.

Составляющие технической эффективности для резервирующей ступени, настроенной по экспертно-руководящему методу приведены в таблице 5.7 (в соответствии с рисунком 5.15).

Таблица 5.7 – Основные показатели IV ступени

| № ст. | Величина уставки, А | Техническая эффективность    | $p(O^{IV})$<br>(суммарные)     | $p(O_{\text{№}}^{IV})$         | $p(O_{\text{пл}}^{IV})$        |
|-------|---------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| IV    | 127                 | 99,9439642674                | $4,97989696273 \cdot 10^{-10}$ | $3,26539061179 \cdot 10^{-10}$ | $1,70573665383 \cdot 10^{-11}$ |
|       |                     | $p(O_{\text{пл}}^{IV})$      | $p(I^{IV})$<br>(суммарные)     | $p(I_{\text{пл\_пл1}}^{IV})$   | $p(I_{\text{пл\_пл2}}^{IV})$   |
|       |                     | $8,769697116 \cdot 10^{-13}$ | $2,02233081699 \cdot 10^{-12}$ | $2,02233081699 \cdot 10^{-12}$ | 0                              |

#### 5.4 Выводы по главе

1. На примере расчета комплекта ТЗНП линии 500 кВ СГРЭС-2 – ПС Ильково (со стороны СГРЭС-2) показано, что разработанное математическое и программное обеспечение в совокупности позволяют оценить техническую эффективность и ее составляющие для токовых ступенчатых релейных защит, а также рассчитать уставки каналов РЗ исходя из максимума технической эффективности. Уставки, полученные по критерию технической эффективности, сопоставимы с уставками по ЭРМ и удовлетворяют требованию чувствительности.

2. Установлено, что существующий экспертно-руководящий метод настройки токовых РЗ дает наилучший результат при наличии области оптимальных уставок, оцениваемой по графику технической эффективности. В

других случаях, когда данная область имеет небольшой диапазон, имеются затруднения, связанные со сложностью выбора максимальных и минимальных режимов для обеспечения селективности и проверки чувствительности соответственно. Данное затруднение может быть преодолено с помощью разработанного критерия технической эффективности. Так, вторую ступень ТЗНП линии рассматриваемой линии, которая не может быть однозначно выбрана по экспертно-руководящему методу, можно настроить по предлагаемому критерию на величину 1706 А с эффективностью 99,7881744118 % и чувствительностью к минимальным токам КЗ (свойственным маловероятному режиму), равной 0,705.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, заключаются в следующем:

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. На основании данной классификации введен частный критерий технической эффективности, описывающий функционально-метрологическую составляющую потерь в рамках обобщающего и полного критерия эффективности функционирования, отображающего высшее свойство совершенства РЗ в иерархии от надежности через техническое совершенство к эффективности функционирования. Введенный частный 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 действие события (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 RPTEC 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 уставок 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 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электро-энергетических систем: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.: ил.
2. Прутик А.Ф., Чан М., Шмойлов А.В. Селективность и техническая эффективность релейной защиты и автоматики // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3-4/I. – С. 154-164.
3. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.: ил.
4. Шабад М.А. Об учете работы релейной защиты // Энергетик. – 2002. – №7. – С. 9.
5. В.И.Гуревич. Надежность микропроцессорных устройств релейной защиты: мифы и реальность // Вести в электроэнергетике, №4, 2008, с. 29 – 38.
6. He S., Shen L., Lui J. Analyzing Protective Relay Misoperation Data and Enhancing Its Correct Operation Rate. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.
7. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110-500 кВ. Расчеты. – М.: Энергия, 1980. – 88 с., ил.
8. Правила устройства электроустановок. Издание седьмое.
9. Коновалова Е.В., Сахаров С.В. Устройства РЗА в ЕНЭС. Основные результаты работы // Новости электротехники. – 2008. – № 3 (51).
10. Гуревич В.И. Проблемы оценки надежности релейной защиты // Электричество. – 2011. – № 2. – С. 28-31.
11. Зейлидзон Е.Д., Смирнов Э.П., Федосеев А.М. Основные свойства релейной защиты от коротких замыканий электроэнергетических систем // Электричество. – 1975. – № 4. – С. 1-7.
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.

13. Надежность систем энергетики. Терминология. Под ред. Ю.Н. Руденко. Вып. 95 – М.: Наука, 1980. – 42 с.

14. Беркович М.А., Мельников М.Ф. Опыт освоения и эксплуатации релейной защиты и линейной автоматики электропередач 400-500 кВ // Электричество. – 1964. – № 12. – С. 1-5.

15. Фабрикант В.Л. О применении теории надежности к оценке устройств релейной защиты // Электричество. – 1965. – № 9. – С. 37-40.

16. Кулиев Ф.А. О надежности работы устройств релейной автоматики электрических сетей // Электричество. – 1965. – № 9. – С. 40-44.

17. Смирнов Э.П. Подход к расчету надежности устройств релейной защиты // Электричество. – 1965. – № 9. – С. 44-49.

18. Смирнов Э.П. Зависимость надежности релейной защиты от условий эксплуатации и надежности защищаемого элемента // Электричество. – 1966. – № 6. – С. 32-37.

19. Рипс Я. А. Зависимость надежности релейной защиты от условий эксплуатации и надежности защищаемого элемента // Электричество. – 1967. – № 8. – С. 81-83.

20. Барзам А. Б. Зависимость надежности релейной защиты от условий эксплуатации и надежности защищаемого элемента // Электричество. – 1967. – № 8. – С. 83-87.

21. Гук Ю.Б., Манов Н.А. Зависимость надежности релейной защиты от условий эксплуатации и надежности защищаемого элемента // Электричество. – 1967. – № 8. – С. 87-89.

22. Смирнов Э.П. Об особенностях техники надежности релейной защиты // Электричество. – 1967. – № 8. – С. 89-93.

23. Надежность технических систем и изделий. Основные понятия, терминология (вып. 67а). – Изд-во «Наука», 1965.
24. Гук Ю.Б., Зейлидзон Е.Д., Манов Н.А. О применении основных понятий и критериев теории надежности в релейной защите // Электрические станции. – 1967. – № 8. – С. 67-74.
25. Гук Ю.Б. О показателях надежности устройств релейной защиты // Электрические станции. – 1971. – № 3. – С. 90-91.
26. Барзам А.Б. О применении критериев теории надежности к технике РЗ. Электрические станции. – 1969. – № 1. – С. 87-90.
27. Смирнов Э.П. О критериях надежности // Электричество. – 1973. – № 5. – С. 24-28.
28. Зейлидзон Е.Д. Статистические данные о работе релейной защиты в энергосистемах Министерства электростанций за 1945-1946 гг. // Электрические станции. – 1947. – № 12. – С. 11-14.
29. Основы техники релейной защиты / М.А. Беркович, В.В. Молчанов, В.А. Семенов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с., ил.
30. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. Учебник для вузов. М., «Энергия», 1976 г. – 560 с.: ил.
31. Гельфанд Я.С. О критерии надежности устройств релейной защиты // Электричество. – 1973. – № 10. – С. 83-84.
32. Гельфанд Я.С. О взаимосвязи между надежностью релейной защиты и надежностью защищаемой распределительной сети // Электричество. – 1984. – № 2. – С. 47-49.
33. Аберсон М.Л., Сысоев Л.П. Вероятностные характеристики напряжения в электрических сетях // Электричество. – 1973. – № 8. – С. 18-27.
34. Хайн М., Глазунов А.А. О вероятностных и статистических характеристиках токов коротких замыканий в системах электроснабжения // Электричество. – 1980. – № 1. – С. 5-11.

35. Манусов В.З., Лыкин А.В. Вероятностный анализ установившихся режимов электрических систем // Электричество. – 1981. – № 4. – С. 7-13.
36. Львов Ю.Н. Расчет вероятностей наибольших мгновенных значений тока короткого замыкания // Электричество. – 1984. – № 9. – С. 52-55.
37. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 296 с., ил.
38. Каринский Ю.И. Статистический расчет дистанционных защит // Электричество. – 1971. – № 2. – С. 30-33.
39. Якоб Д. Вероятностный подход к оценке технического совершенства и расчету характеристик устройств релейной защиты // Электричество. – 1974. – № 7. – С. 23-27.
40. Дроздов А.Д., Гармаш В.А., Беркович М.А., Ильиничнин В.В. Вероятность возникновения больших погрешностей трансформаторов тока в переходных режимах и оценка действия релейных защит Электричество. – 1978. – № 6. – С. 24-29.
41. Мёллер К. Ю. Об оптимизации системы релейной защиты и автоматизации электроустановок / К. Ю. Мёллер // Тр. Тал. политехи, ин-та. - Таллин, 1965.-Сер А. - С. 103-112.
42. Кутыркин А.В., Михайлов В.В., Шишкин В.Н. Алгоритм распознавания аварийных ситуаций в автономных электроэнергетических системах // Электричество. – 1971. – № 4. – С. 29-34.
43. Якоб Д. Распределение тока короткого замыкания в радиальных электрических сетях // Электричество. – 1973. – № 7. – С. 18-24.
44. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984 г. – 520 с., ил.
45. Шалин А.И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.

46. Купер Дж, Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем. – М.: Мир, 1989. – 376 с.
47. Манов Н.А. Анализ надежности релейной защиты на основе эксплуатационной статистики // Электрические станции. – 1968. – № 3. – С. 56-58.
48. Шалин А.И., Трофимов А.С. Эффективность и надежность релейной защиты энергосистем [Электронный ресурс]: Режим доступа [www.energo-info.ru/images/pdf/Rele/Session\\_7/S7-1.pdf](http://www.energo-info.ru/images/pdf/Rele/Session_7/S7-1.pdf), свободный, 16.07.2011.
49. Шалин А.И. К вопросу об эффективности и надежности новых устройств РЗА [Электронный ресурс]: Режим доступа <http://www.pnpbolid.ru/publish.php>, свободный, 16.07.2011.
50. Нудельман Г.С., Шалин А.И. Микропроцессорные системы РЗА. Оценка эффективности и надежности // Новости электротехники. – 2008. – № 3 (51) . – С. 74-79.
51. Moxley R. Analyze Relay Fault Data to Improve Service Reliability [Электронный ресурс]: Режим доступа <http://www.selinc.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=2807>, свободный, 16.07.2011.
52. Ward S., Dahlin T., Higinbotham W. Improving Reliability for Power System Protection [Электронный ресурс]: Режим доступа [http://www.rflect.com/pdf\\_files/Improving%20Reliability%20for%20Power%20System%20Protection.pdf](http://www.rflect.com/pdf_files/Improving%20Reliability%20for%20Power%20System%20Protection.pdf), свободный, 16.07.2011.
53. РД 34.3.516-89. Инструкция по учету и оценке работы релейной защиты и автоматики электрической части энергосистем.
54. Гуревич В.И. О некоторых оценках эффективности и надежности микропроцессорных устройств релейной защиты // Вести в электроэнергетике. – 2009. – № 5. – С. 29-32.
55. А.Л. Куликов, А.Н. Клюкин. Статистические методы повышения эффективности средств релейной защиты: Труды 3-ей Международной научно-

технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» - Санкт-Петербург, 30 мая – 3 июня 2011 [Электронный ресурс]: Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/666467/>, свободный, 24.03.2012.

56. 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.

57. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Разработка алгоритмов и программ для настройки и оценки технической эффективности релейной защиты // Электричество. – 2009. – №12. – С. 19-26.

58. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Приведение излишних и ложных действий релейной защиты к отказам срабатывания // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-и частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. Часть 3 – С. 183-185.

59. Прутик А.Ф. Техническая эффективность основных ступеней релейных защит линий // Материалы докладов IV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». Казань: Изд-во КГЭУ, 2009. Том 1 – С. 154-156.

60. Прутик А.Ф. Расчетная оценка излишних действий токовых релейных защит // Современные техника и технологии: Труды XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск, 4-8 мая 2009. – Томск: ТПУ, 2009 – т. 1. – С. 82-84.

61. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Алгоритм и компьютерная программа расчета технической эффективности первой ступени ступенчатой токовой защиты нулевой последовательности линии // Динамика систем, механизмов и машин: матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. – кн. 1. С. 413-418.

62. Прутик А.Ф. Использование вероятностно-статистических методов для оценки технической эффективности энергосистем // Современная техника и технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Томск, 12-16 апреля 2010. – Томск: ТПУ, 2010 – т. 1. – С. 99-100.

63. Прутик А.Ф., Чан М., Шмойлов А.В. Методы расчета уставок релейной защиты и автоматики // Обмен опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств РЗА и ПА в энергосистемах Урала: Тезисы докладов XVI научно-технической конференции - Екатеринбург, 19-22 апреля 2010. - Екатеринбург: [s.n.], 2010. – С. 108-109.

64. Прутик А.Ф. Техническая эффективность ступенчатых токовых защит // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых - Новосибирск, 3-5 декабря 2010. – Новосибирск: НГТУ, 2010 – т. 2. – С. 110-112.

65. 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.

66. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Определение потерь от излишних действий токовой защиты с использованием равномерного распределения сопротивления внешних элементов // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды всероссийской научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФУ, 2010. Т. 2. 330 С. – С.59-64.

67. Прутик А.Ф., Снегирева К.К., Шмойлов А.В. Настройка ступенчатых токовых релейных защит на основе технической эффективности // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды международной научно-технической конференции: сборник статей. В 3 т. Самара: СамГТУ, 2011. Т.2. 383 с. – С.78-83.

68. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Анализ технической эффективности и вариантов настройки ступенчатых токовых защит // Материалы семнадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 409 с. – С. 55-59.

69. 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.

70. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Наука, 1979. – 496 с.

71. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. Шк., 1998. – 576 с.: ил.

72. Шмойлов А.В., Кривова Л.В., Стоянов Е.И., Игнатьев К.В. Вероятностный метод селекции границ интервалов данных для задач электроэнергетики. – Изв. ВУЗов «Проблемы энергетики», 2008, № 7 – 8/1. – с. 146 – 157.

73. Электротехнический справочник: В 4-х т. Т. 3. Производство и распределение электрической электроэнергии / под общ. ред. профессоров МЭИ: Герасимова В.Г. и др. (гл. ред. Попов А.И.) – 8-е изд. испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 964 с.

74. 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.

75. Прутик А.Ф., Чан М., Шмойлов А.В. Метод селекции границ интервалов данных для определения законов распределения функциональных зависимостей // Электроэнергия: от получения и распределения до

эффективного использования: Материалы всероссийской научно-технической конференции – Томск, 25-28 мая 2010. – Томск: ТПУ, 2010. – С. 190–192.

76. Тимченко В.Ф. Колебания нагрузки и обменной мощности энергосистем. Анализ и синтез для решения задач управления режимами объединенных энергосистем. Под ред. В.А. Веникова. М., «Энергия», 1975 г. – 208 с.: ил.

77. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 376 с., ил.

78. Вероятностные методы в вычислительной технике: Учеб. пособие для вузов по спец. ЭВМ / А.В. Крайников, Б.А. Курдилов, А.Н. Лебедев и др.; Под ред. А.Н. Лебедева и Е.А. Чернявского. – М.: Высш. Шк., 1986. – 312 с.: ил.

79. Основы вероятностных расчетов в электроэнергетике: Учеб. пособие / А.В. Шмойлов. – Томский политехнический университет, 1978. – 93 с.

80. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х томах. Т. 1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 528 с., ил.

81. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Алгоритм оценки технической эффективности дифференциальной токовой защиты. Электрические станции. – 2009. – №12. – С. 30-36.

82. 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. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973.

83. ГОСТ 21027-75 Системы энергетические. Термины и определения.

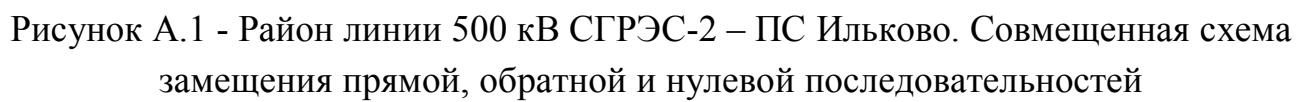
84. Рюденберг Р. Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок: Пер. с нем. / Под ред. К.С. Демирчяна – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 578 с., ил.
85. Овчаренко Н.И. Автоматика энергосистем : учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Н.И. Овчаренко ; под ред. чл.-кор. РАН, докт. техн. наук, проф. А.Ф. Дьякова. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 476 с.: ил.
86. IEC60044-1. Instrument transformers. Part 1: Current transformers. Edition 1.2. 2003-02. International Electrotechnical Commission. Международная электротехническая комиссия.
87. Чернобровов Н.В. Релейная защита. Учебное пособие для техникумов. Изд. 5-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1974. – 680 с.: ил.
88. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981 – 704 с.: ил.
89. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Удельные веса излишних и ложных действий релейной защиты относительно отказов срабатывания // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы XIV научно-технической конференции. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 51-54.
90. Прутик А.Ф. Компьютерная программа расчета технической эффективности первой ступени ступенчатой токовой защиты нулевой последовательности линии // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых в 7-ми частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. Часть 3 – 355 с. – С. 155-157.
91. Прутик А.Ф. Проектирование компьютерной программы для расчетов технической эффективности релейной защиты // Материалы семнадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 409 с. – С. 59-61.
92. Справочник по проектированию электрических сетей. Под редакцией Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2005 – 320 с.: ил.

93. B.D. Shriver. Software paradigms. IEEE Software, 3(1):2, January 1986.
94. Бадд Т. Объектно-ориентированное программирование в действии / перев. с англ. – СПб.: Питер, 1997. ISBN 5-88782-270-8.
95. Фаронов В.В. Delphi 5. Учебный курс. – М.: «Нолидж», 2000. – 608 с., ил.
96. Переходные процессы в электрических системах : учеб. пособие / Ю.А. Куликов. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 284 с. – («Учебники НГТУ»).

## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

### **СХЕМЫ АНАЛИЗИРУЕМОГО РАЙОНА**

Для расчетов, в качестве примера, использована база данных Тюменской энергосистемы, которая для ТКЗ 3000 представляет собой совмещенную схему замещения прямой, обратной и нулевой последовательности. Схема замещения рассчитываемого района линии СГРЭС-2 – ПС Ильково 500 кВ приведена на рисунок А.1. На рисунке А.2 приведена схема электрических соединений.



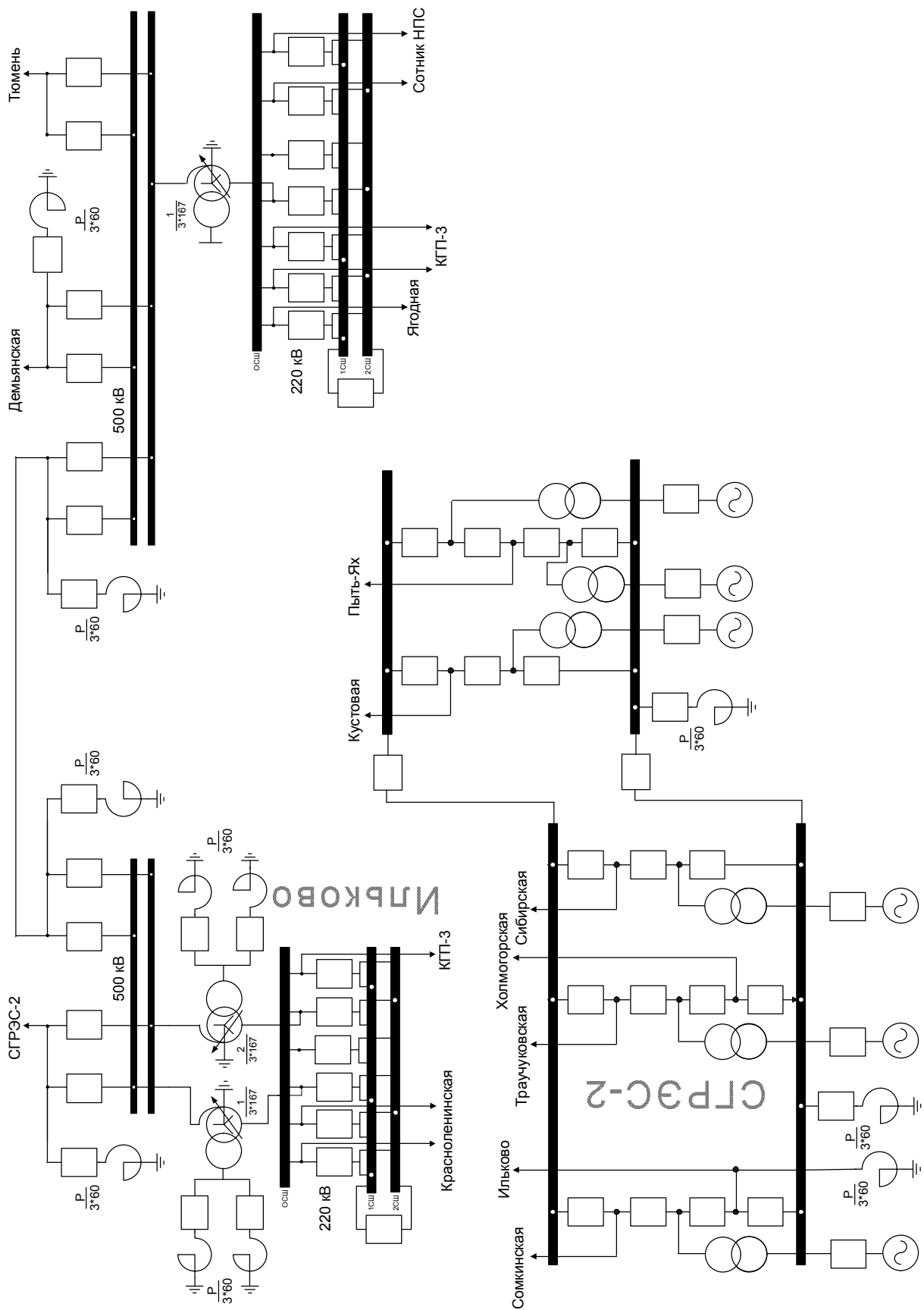


Рисунок А.2 - Район линии 500 кВ СГРЭС-2 – ПС Ильково.  
Схема электрическая соединений

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

**АКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор-директор

Энергетического института ТПУ

Боровиков Ю.С.

« 4 » 04 2012 г.

### АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
Прутика Алексея Федоровича  
«Вероятностно-статистический критерий эффективности настройки  
токовых релейных защит и методика ее повышения»

Настоящим актом подтверждается использование в учебном процессе Энергетического института Томского политехнического университета результатов диссертационной работы. Основные положения диссертации используются при чтении лекций по предмету «Вероятностные задачи электроэнергетики», разработанная Прутиком А.Ф. компьютерная программа служит инструментом для проведения лабораторных работ.

Заместитель проректора-директора  
по учебной работе

Лукутин А.В.

УТВЕРЖДАЮ:

Директор

Филиала ОАО «СО ЕЭС»

«Региональное диспетчерское управление

Энергосистемы Томской области»

Дроздович Н.П.

« 2 » 2012 г.



### АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Прутика Алексея Федоровича

«Вероятностно-статистический критерий эффективности настройки  
токовых релейных защит и методика ее повышения»

Настоящим актом подтверждается, что разработанные в диссертации критерий технической эффективности и компьютерная программа для расчета технической эффективности позволяют оценить эффективность настройки ступеней токовых защит нулевой последовательности, установленных на линиях 110-220 кВ Томской энергосистемы, и в особо сложных случаях могут служить вспомогательным инструментом при выборе уставок токовых защит.

Начальник службы релейной  
защиты и противоаварийной  
автоматики

Панков Н.А.