

На правах рукописи

Нефедов Сергей Федорович

**ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ОБЪЕКТОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО
КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата
технических наук**

Барнаул - 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
О.Н. Дробязко (ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
А.А. Багаев (ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет»);
кандидат технических наук, доцент
Ю. А. Меновщиков (ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет»)

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет»

Защита состоится 22 мая 2012 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, проспект Ленина, 46.

<http://www.altstu.ru>; ntsc@desert.secna.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью Вашего учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «20» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Л.В. Куликова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. До настоящего времени остается актуальной проблема обеспечения электрической и пожарной безопасности электроустановок до 1000 В объектов АПК. Состояние электробезопасности в сельском хозяйстве характеризуется тем, что при общем ежегодном количестве людей, погибающих от воздействия электрического тока порядка 4,5 тыс. человек, в сельской местности происходит около 70% электротравм. Состояние пожарной безопасности характеризуется тем, что значительную часть (20 ...25 %) составляют пожары от электротехнических причин (электропожары). В 2010 г на сельскую местность пришлось 38,8% от общего числа пожаров.

Для обеспечения электрической и пожарной безопасности на объектах АПК используются специальные организационно-технические системы, называемые системами безопасности электроустановок (СБЭ). Основную роль в этих системах играют их технические подсистемы, включающие подсистему аппаратов защиты (АЗ) и проводниковую защитную подсистему.

Важной особенностью СБЭ является возможность их многовариантного исполнения для одного и того же объекта. Это обстоятельство создает условия для выбора наилучшей технической системы безопасности для данного объекта.

Обоснование такого выбора составило содержание основной научной задачи теоретических основ электробезопасности, поставленной А.И. Якобсом в конце 70-х годов прошлого века.

В 2000 г. О.К. Никольским был сформулирован принцип оптимальной безопасности, основой которого является повышение уровня безопасности электроустановок не за счет крупных капитальных вложений, а путем оптимизации системы обеспечения безопасности.

К настоящему времени отечественными учеными разработаны методы и средства, позволяющие решать задачи моделирования процесса функционирования и оптимального выбора СБЭ на объектах АПК. Однако практическое использование разработанных методов и средств в научных исследованиях и проектной практике выявили серьезные проблемы в подготовке части исходных данных, необходимых для проведения расчетов.

К ним относились данные, представляющие собой вероятности некоторых событий, происходящих в системе электроснабжения (СЭС) объекта и в СБЭ. Для получения таких данных необходим специальным образом организованный сбор статистической информации на выбранных множествах объектов АПК. Однако до настоящего времени сбор статистической информации в необходимых объемах оказывается невозможным. В связи с этим используемые в настоящее время для расчетов статистические оценки вероятностей имеют низкую достоверность, рассматриваемую как неопределенность. Поскольку такая неопределенность в принципе устранима, то ее можно назвать потенциально-устранимой неопределенностью. Оценки вероятностей

имеют также и неустранимую статистическую неопределенность, обусловленную случайным характером таких оценок.

Другим видом исходных данных являются семейства защитных характеристик АЗ и семейства характеристик пережога проводов. Каждая из таких характеристик имеет «разброс» значений. Они содержат неустранимую неопределенность значений времен срабатывания и времен пережога, отвечающих каждому конкретному значению тока короткого замыкания (КЗ).

Наличие неопределенности в группах исходных данных приводит к тому, что вычисленные значения показателей эффективности СБЭ являются неопределенными величинами. Их дальнейшее использование в качестве критериев оптимизации приводит к неопределенности выбора оптимального варианта СБЭ. Таким образом, неопределенность исходных данных становится серьезной проблемой, ставящей под сомнение как точность результатов моделирования СБЭ, так и правомерность результатов ее оптимизации.

Целью работы является совершенствование методик автоматизированного расчета эффективности и оптимизации систем безопасности электроустановок в условиях неопределенности исходных данных.

Для достижения поставленной цели необходимо решение **следующих задач:**

- анализ характера неопределенности исходных данных и их влияния на результаты расчета эффективности СБЭ;
- выбор математических методов, позволяющих производить описание неопределенных исходных данных СБЭ, выполнять расчеты показателей ее эффективности с учетом неопределенности и осуществлять выбор оптимального варианта системы при неопределенности критериев оптимизации;
- разработка методов моделирования процесса функционирования СБЭ в условиях неопределенности,
- разработка методов одно- и двухкритериальной оптимизации СБЭ в условиях неопределенности критериев;
- разработка программного средства, позволяющего реализовывать методы моделирования и оптимизации СБЭ.

Объект исследования. Процесс функционирования систем обеспечения безопасности электроустановок до 1000 В на объектах АПК, обеспечивающий предотвращение электропоражений людей, взаимодействующих с электроустановками, и возникновение пожаров от аварийных режимов электроустановок при коротких замыканиях.

Предмет исследования. Обоснование выбора оптимальных систем безопасности электроустановок на объектах АПК в условиях учета неопределенности исходных данных

Методы исследования. Теория вероятностей, прикладная статистика, математическое моделирование, исследование операций, интервальный анализ, теория нечетких множеств, компьютерное моделирование.

Научную новизну представляют:

- методы моделирования СБЭ в условиях неопределенности, позволяющие учитывать различные виды неопределенности исходных данных и определять значения показателей эффективности варианта системы, установленного на объекте;

- методы одно- и двухкритериальной оптимизации СБЭ в условиях неопределенности при использовании интервального и нечеткого описания критериев оптимизации.

Практическую ценность работы представляют:

- методика моделирования СБЭ в условиях неопределенности исходных данных, позволяющая учитывать различные виды их неопределенности при расчетах эффективности системы безопасности для конкретного или проектируемого объекта АПК;

- методика оптимизации СБЭ в условиях неопределенности, позволяющая выбрать наилучший вариант системы безопасности для конкретного или проектируемого объекта АПК;

- интегрированный программный комплекс, позволяющий производить расчет показателей эффективности вариантов СБЭ и выбор оптимального варианта системы с учетом неопределенности исходных данных;

- возможность широкого внедрения методов оптимизации СБЭ в проектную практику за счет снижения требований к степени определенности вводимой информации;

- возможность получения информации о целесообразности дополнительных затрат на мероприятия, уменьшающие степень неопределенности исходной информации.

Работа выполнена в соответствии с Концепцией развития электрификации сельского хозяйства России (МСХ РФ, Минэнерго РФ, РАСХН / М., 2002 г.) и аналитической ведомственной целевой программой «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009 – 2011 годы).

Реализация и внедрение результатов работы.

Научные положения, выводы и рекомендации использованы при реализации Госконтракта ГК -118/2009 с Управлением гражданской обороны, чрезвычайных ситуаций и пожарной безопасности в Алтайском крае на выполнение работ по обеспечению электропожаробезопасности путем совершенствования систем электрической защиты с применением устройств защитного отключения на 14 объектах Алтайского края, в том числе 12 сельских образовательных учреждений в рамках краевой целевой программы «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного в Алтайском крае на 2005–2010 гг.»

Методические рекомендации по созданию комплексной системы обеспечения безопасности электроустановок сельских населенных пунктов принята к использованию Главным управлением сельского хозяйства Алтайского края.

Апробация работы. Основные материалы и результаты работы представлялись и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях

студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава Алтайского государственного технического университета (Барнаул, 2009, 2010, 2011 гг.), XI международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, автоматизация» (ИКИ-2010) (Барнаул, 2010 г.), X Международная научно-техническая конференция «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых» (Донецк, 2010 г.)

На защиту выносятся следующие основные положения.

1. Для повышения достоверности оптимизационных расчетов СБЭ необходимо учитывать неопределенность части исходных данных.

2. Математический аппарат для решения задачи оптимизации СБЭ в условиях неопределенности, должен позволять решать совокупность трех задач: 1) описание неопределенности исходных данных, 2) выполнение алгебраических операций с промежуточными данными моделирующих алгоритмов, 3) сравнение рассчитанных неопределенных значений критериев оптимальности.

3. Решение задач оптимизации СБЭ в условиях неопределенности возможно с использованием методов интервального анализа и методов теории нечетких множеств.

4. Алгоритм моделирования СБЭ должен предусматривать ввод интервально-неопределенных характеристик срабатывания аппаратов защиты и перегоя, а также ввод вероятностных исходных данных, представляемых в виде интервалов или нечетких чисел.

5. Одно– или двухкритериальная оптимизация СБЭ может производиться с использованием интервального или нечеткого критериев.

6. Для оценки достоверности результатов оптимизации СБЭ в условиях неопределенности исходных данных необходимо выполнять анализ степени неопределенности вычисленных показателей эффективности системы, критериев оптимальности и степени неопределенности выбора оптимального варианта СБЭ.

Публикации. По материалам диссертационных исследований опубликовано 13 печатных работ, в том числе, 6 - в изданиях по перечню ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 16 рисунков, 6 таблиц, 4 приложения. Список литературы включает 60 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены сведения об апробации основных результатов работы, изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ состояния электрической и пожарной безопасности электроустановок объектов АПК, рассмотрены роль и основные положения теории обеспечения безопасности электроустановок, выявлены проблемы информационного обеспечения расчетов и учета неопределенности исходных данных, сформулированы задачи исследования.

Ежегодно в электроустановках зданий от воздействия электрического тока гибнет более 4,5 тыс. человек, при этом на долю сельской местности приходится около 70% от общего числа электротравм.

В общей статистике пожаров около 20% составляют пожары от электротехнических причин. В 2010 году в сельской местности Российской Федерации зарегистрировано около 79 тысяч пожаров, что составило 38,8% от общего количества пожаров.

Электрическая и пожарная безопасность электроустановок на объектах АПК обеспечивается с помощью специальных организационно-технических систем (СБЭ), представляющих собой совокупности взаимосвязанных организационно-технических мероприятий и электротехнических средств, включающих основную защиту, защиту от неисправности и дополнительную защиту. Основу таких систем составляют технические подсистемы, имеющие обычно несколько защитных функций. Так, для реализации защитной меры «автоматическое отключение питания» широко используются предохранители и автоматические выключатели. Одновременно эти устройства обеспечивают и защиту от электропожаров. Несколько защитных функций имеют и устройства защитного отключения по току утечки (УЗО). В состав технических подсистем СБЭ помимо аппаратов защиты обычно входят и системы защитных проводников. Можно считать, что в состав СБЭ входят подсистема аппаратов защиты (АЗ) и проводниковая защитная подсистема.

Особенностью технических подсистем СБЭ является их многовариантность. Для одного и того же объекта (для одной и той же СЭС объекта), могут быть созданы различные варианты технической системы безопасности, отличающиеся видом используемых аппаратов защиты, их расположением, сериями и защитными параметрами. При этом все такие варианты будут удовлетворять имеющимся нормативным требованиям и действующим методикам выбора электротехнических систем. Это обстоятельство создает условия для выбора наилучшей технической системы безопасности электроустановок для конкретного объекта АПК.

Такой выбор может быть осуществлен в результате изучения закономерностей процессов, обуславливающих действие электроустановок на окружающие их объекты при учете действия систем безопасности. Результаты такого изучения систематизируются в форме теории обеспечения безопасности электроустановок. Совокупность таких знаний составляет научные основы построения систем обеспечения безопасности.

На необходимость создания общей теории электробезопасности в конце 70-х годов прошлого века впервые указал А. И. Якобс. В это же время им была сформулирована основная научная задача, решение которой позволит

завершить создание теоретических основ электробезопасности. Она формировалась как типичная прогнозно-оптимизационная.

На протяжении последующих лет развитие теории электробезопасности осуществлялось в направлении учета различных функций систем безопасности электроустановок. В работах С. И. Кострубы была учтена функция защиты сельскохозяйственных животных, в работах А. А. Сошникова – функция учета электропожаров.

В начале 90-х годов появилось много терминов, обозначающих многофункциональные системы безопасности электроустановок («система комплексной безопасности», «система электропожаробезопасности», «комплексная система электропожаробезопасности»). В настоящее время в качестве устоявшегося термина для обозначения двухфункциональных систем безопасности используется термин «система безопасности электроустановок».

Задача построения оптимальной системы безопасности электроустановок остается актуальной и до настоящего времени. Так, в 2000 г. О. К. Никольским был сформулирован принцип оптимальной безопасности, состоящий в том, что построение и использование оптимальных систем обеспечения электробезопасности является в настоящее время для России единственным реальным путем резкого снижения опасности электроустановок.

В настоящее время задача оптимизации СБЭ на объектах АПК в целом решена. Так, на основе использования системного подхода выполнено описание СБЭ и ее внешней среды. Выделена макросистема «электроустановка - СБЭ - объект защиты» («Э-СБЭ-ОЗ»). (В качестве объекта защиты рассматриваются люди на объекте и объекты пожара). Такое описание позволяет определить функции СБЭ как «уменьшение интенсивности» воздействий электроустановок на объекты защиты и рассматривать «остаточную» опасность электроустановок как меру эффективности СБЭ. При этом функции СБЭ «расщепляются» на две подфункции – обеспечение электрической безопасности и обеспечение пожарной безопасности.

В настоящее время имеется набор (семейство) математических моделей, позволяющих моделировать процесс функционирования СБЭ в аспекте обеспечения электробезопасности (при косвенном прикосновении и прямом прикосновении), а также в аспекте обеспечения пожаробезопасности (разработаны три разновидности). В моделях учитываются три вида аппаратов защиты: предохранители, автоматические выключатели и УЗО.

В наиболее общем виде такие модели могут быть охарактеризованы как детерминированно-вероятностные. В них учитывается структура системы электроснабжения объекта и структура его СБЭ. Они представляют собой моделирующие алгоритмы, имеющие иерархическую структуру.

Определяемые в результате моделирования показатели эффективности СБЭ дают количественную оценку «остаточной» опасности электроустановок на объекте. Используются две группы показателей: показатели электробезопасности и показатели пожаробезопасности. В пределах каждой из групп показатели делятся на индивидуальные и интегральные. При этом интеграль-

ные показатели вычисляются на основе индивидуальных. Структура системы показателей эффективности СБЭ приведена на рисунке 1.

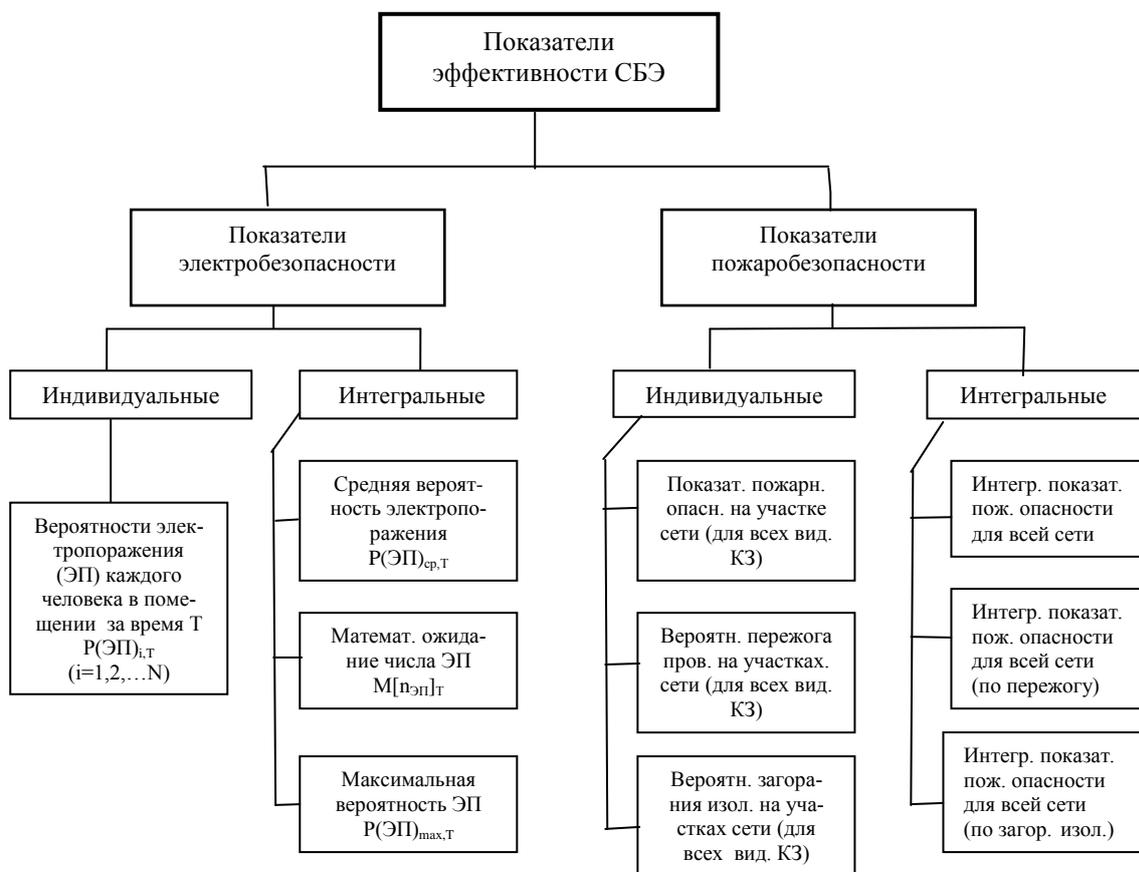


Рисунок 1 – Система показателей эффективности СБЭ

Особенностью решения задачи оптимизации СБЭ является возможность постановки как задач однокритериальной оптимизации, так и задачи многокритериальной оптимизации. Задачи первого вида ставятся при учете только одной защитной функции СБЭ. В качестве критерия оптимизации может быть выбран любой интегральный показатель эффективности СБЭ. При постановках задач оптимизации может учитываться экономический критерий «приведенные затраты на создание и эксплуатацию СБЭ». При постановке задачи многокритериальной оптимизации используются два частных критерия. На их основе формируется скалярный аддитивный критерий, подлежащий минимизации. Количество допустимых вариантов, рассматриваемых при решении задачи оптимизации СБЭ, относительно невелико. Поэтому выбор оптимального варианта системы осуществляется методом сплошного перебора.

Таким образом, в настоящее время разработано все необходимое математическое обеспечение оптимизации СБЭ на объектах АПК. Созданы также программные средства реализации оптимизационных расчетов.

При выполнении указанных расчетов на ЭВМ должен быть введен определенный перечень исходных данных. В частности, должны быть введены данные о вероятностях свершения случайных событий, которые могут возникнуть при функционировании СЭС объекта и СБЭ. Методика получения таких данных предусматривает их выбор из специального справочника вероятностей, формируемого на основе результатов специально организованных наблюдений за свершениями указанных событий на группах аналогичных объектов. В силу ряда причин, в первую очередь из-за отсутствия финансирования, возможность выполнения наблюдений на требуемом числе объектов в течение достаточно длительного времени отсутствует. В связи с этим используемые в настоящее время статистические оценки вероятностей имеют низкую достоверность, которую можно рассматривать как некоторую степень неопределенности. Такая неопределенность в принципе может быть устранена, поэтому ее можно назвать потенциально-устранимой.

В дополнение к этому оценки вероятностей имеют также и неустранимую статистическую неопределенность, обусловленную случайным характером таких оценок. Таким образом, вводимое значение вероятности обладает неопределенностью или погрешностью ее истинного значения. Это приведет к появлению неопределенности значений рассчитанных показателей эффективности СБЭ, а также построенных на их основе критериев оптимизации. Неопределенность критериев оптимизации может привести к неправильности выбора оптимального варианта СБЭ.

При проведении оптимизационных расчетов имеется еще одна группа данных, обуславливающих неопределенность результатов моделирования и оптимизации СБЭ. Ими являются семейство защитных характеристик и семейство характеристик пережога проводов. Каждая из таких характеристик имеет «разброс» значений. Это приводит к последующему «разбросу» значений промежуточных данных, образующихся в процессе моделирования, и к неопределенности значений рассчитанных показателей эффективности СБЭ. Это, в свою очередь, приводит к неопределенности значений критериев оптимизации и неопределенности в выборе оптимального варианта СБЭ.

Влияние неустранимой и потенциально-устранимой неопределенности исходных данных на результаты моделирования СБЭ и однофункциональных систем безопасности является серьезной проблемой, ставящей под сомнение как правильность (точность) результатов моделирования, так и правильность результатов оптимизации. Для решения возникших проблем необходима разработка методов, позволяющих учитывать влияние различных видов неопределенности на результаты расчетов показателей эффективности СБЭ и результаты ее оптимизации. Изложенное обосновывает цель, поставленную в работе, и задачи, подлежащие решению.

Во второй главе выполнен анализ характера неопределенности исходных данных используемых в настоящее время моделирующих алгоритмов электропожаробезопасности и осуществлен выбор методов анализа неопределенности в СБЭ.

Исходные данные вводятся на различных уровнях алгоритмов. Это предопределяет характер их влияния на результаты моделирования. Структура алгоритма оценки электробезопасности (при косвенном прикосновении) и вводимых исходных данных приведена на рисунке 2.

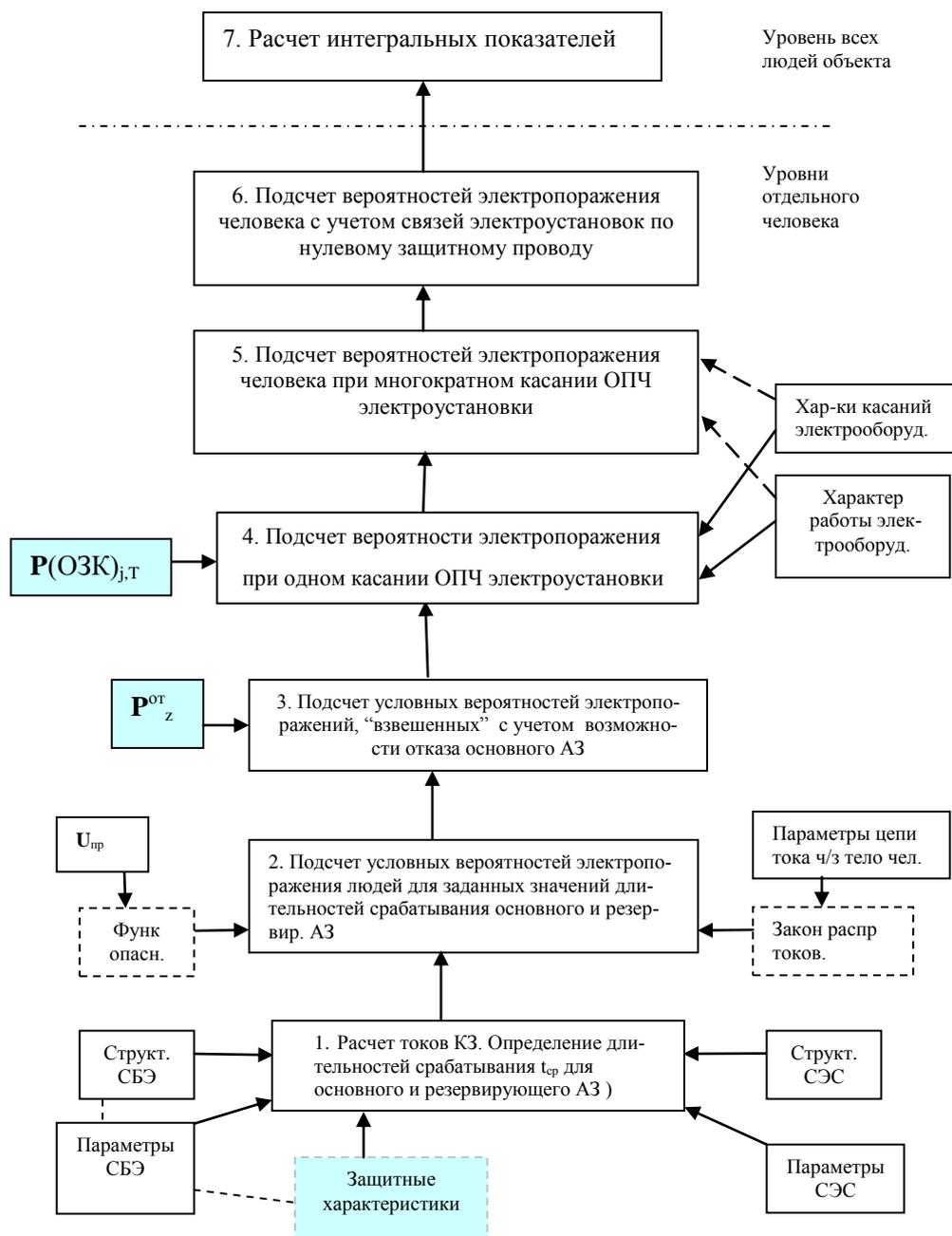


Рисунок 2 – Структура алгоритма оценки электробезопасности и исходных данных (при косвенном прикосновении)

Моделирующий алгоритм имеет семь уровней (этапов). На первом уровне алгоритма производятся вспомогательные вычисления. На нем вводятся данные о структуре и параметрах СБЭ и СЭС объекта. На основе введенных параметров АЗ из базы данных извлекаются их защитные характеристики. На втором уровне осуществляется подсчет условных вероятностей электропоражений людей на объекте. Вводятся измеренные значения ожи-

даемого напряжения прикосновения и параметры цепи тока через тело человека. На третьем уровне моделируются последствия возможного отказа АЗ путем вычисления «взвешенной» условной вероятности электропоражения. Вводятся вероятности отказа основного АЗ. На четвертом уровне осуществляется подсчет вероятностей электропоражения людей при одном касании защищенной электроустановки. Вводятся вероятности возникновения однофазного замыкания на корпус (ОЗК) электроустановки. На двух последующих уровнях выполняются процедуры сложения вероятностей, полученных на предыдущих уровнях. В результате этого подсчитываются вероятности электропоражения всех людей на объекте. На седьмом уровне подсчитываются интегральные показатели, оценивающие эффективность СБЭ в аспекте электробезопасности.

Введенные уровни целесообразно разделить на две группы: уровни моделирования электробезопасности для одного человека и уровни моделирования для всех людей на объекте.

Структура алгоритма оценки электробезопасности при прямом прикосновении аналогична структуре рассмотренного алгоритма. Особенностью моделирования является учет действия устройств защитного отключения с малыми значениями номинального отключающего тока. Алгоритм имеет шесть уровней.

На первом уровне осуществляется определение длительностей срабатывания АЗ. Вводятся данные о структуре и параметрах СБЭ и СЭС объекта, измеренные значения фоновых токов утечки. На втором уровне алгоритма осуществляется подсчет условных вероятностей электропоражения людей. При этом вводятся параметры цепи тока через тело человека. На третьем уровне осуществляется подсчет условных вероятностей электропоражений, «взвешенных» с учетом возможности отказа основного АЗ. Вводятся вероятности отказа основного АЗ. На четвертом уровне алгоритма осуществляется подсчет вероятностей электропоражения людей при одном касании токоведущей части (ТВЧ) электроустановки. На этом этапе вводятся вероятности касаний человеком ТВЧ электроустановок. Для их определения используется специальная технология, опирающаяся на статистическую информацию о числе случаев соответствующих электропоражений и коэффициентов, учитывающих тот факт, что не каждое касание человеком ТВЧ является смертельным. На пятом уровне осуществляется подсчет вероятностей электропоражений для каждого человека при возможном касании им всех ТВЧ объекта. На шестом уровне осуществляется расчет интегральных показателей, оценивающих эффективность СБЭ в аспекте электробезопасности. Они идентичны показателям, подсчитываемым для случая косвенного прикосновения.

Охарактеризуем далее используемые в настоящее время алгоритмы оценки пожаробезопасности и вводимые при их использовании исходные данные. Имеется три варианта таких алгоритмов. В двух вариантах алгоритмов моделируется явление пережога проводов вследствие дуговых КЗ, третий вариант алгоритма учитывает также и явление пережога изоляции. Все

варианты алгоритмов имеют общие начальные этапы, поэтому будем рассматривать их как единое семейство. Структура семейства алгоритмов и вводимых исходных данных приведена на рисунке 3.

Первый вариант алгоритма реализует расчет коэффициентов незащищенности на участках сети и во всей сети (на объекте), второй - вероятностей пережога, третий - вероятностей загорания изоляции. На рисунке 3 им соответствуют левая, средняя и правая ветви алгоритма.

На первом уровне алгоритма для каждого участка сети определяется точка пересечения защитной характеристики АЗ, осуществляющего защиту этого участка сети и характеристики пережога провода этого участка сети. На основе этого определяется зона пережога участка сети (незащищенная зона). На этом уровне вводятся данные о структуре и параметрах СБЭ и СЭС объекта. На основе введенных параметров АЗ из базы данных извлекаются их защитные характеристики, а на основе введенных параметров СЭС – характеристики пережога проводов. На втором этапе первого варианта алгоритма осуществляется подсчет коэффициентов незащищенности участков сети, на третьем – подсчет показателей пожарной опасности на участках сети. На четвертом этапе того же варианта алгоритма подсчитывается коэффициент незащищенности для объекта (для всех видов КЗ), на пятом производится подсчет показателей пожарной опасности для всей сети (по каждому виду КЗ), на шестом – вычисление интегрального показателя пожарной опасности для всей сети, учитывающего одновременное действие всех видов КЗ. На третьем и пятом этапах первого варианта алгоритма вводятся вероятности коротких замыканий на участках сети для четырех видов КЗ. Во всех вариантах алгоритмов вводится для каждого участка. В первом алгоритме они могут быть введены и для всей сети.

Второй вариант алгоритма на этапах 2-5 предусматривает вычисление различных вероятностей пережога проводов. В нем предусматривается учет возможности отказа основного АЗ. С этой целью на этапе 3 вводятся значения вероятностей отказа АЗ. На этапе 4 вводятся также вероятности различных видов КЗ на участках сети. Третий вариант алгоритма на этапах 2-5 предусматривает вычисление различных условных вероятностей загорания и учитывает возможность отказа АЗ.

В алгоритме используется выбираемая из базы данных зависимость вероятности загорания изоляции от времени пережога. В нем также на этапе 4 вводятся вероятности различных видов КЗ на участках сети. Шестой этап у всех вариантов алгоритмов построен одинаково. По степени неопределенности информацию обычно подразделяют на детерминированную (четко определенную), вероятностную (стохастическую) и неопределенную. Используются также «промежуточные» степени неопределенности (например, вероятностно-неопределенная информация) и их разновидности (неопределенная информация подразделяется на нечеткую и интервально-неопределенную).

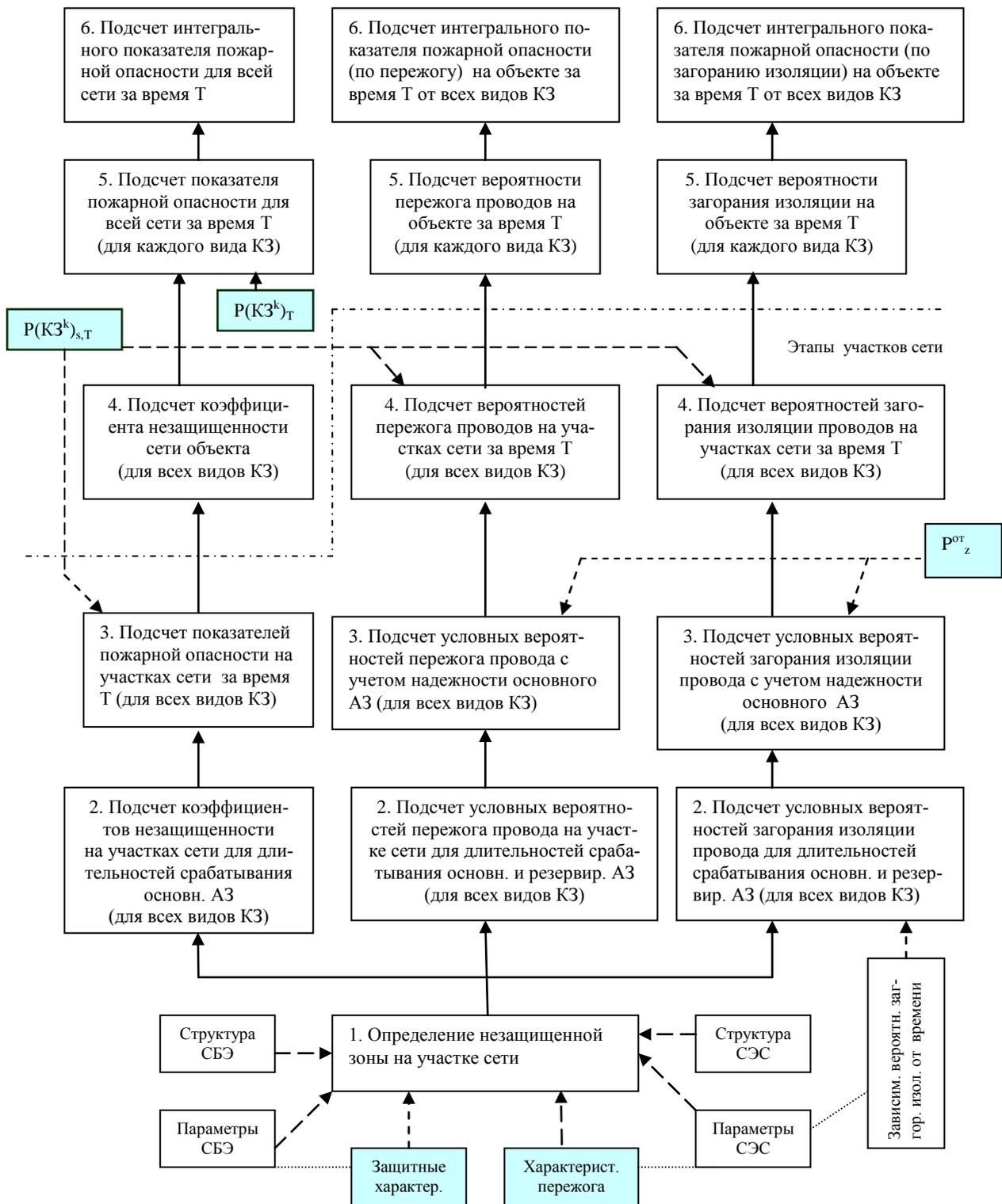


Рисунок 3 - Семейство алгоритмов моделирования пожаробезопасности

Исходные данные, используемые при моделировании СБЭ, имеют все указанные виды неопределенности. Так, к детерминированной информации относятся данные о структуре и параметрах СЭС и СБЭ. Во всех алгоритмах вводятся данные, содержащие вероятностную информацию.

Вводимые вероятностные данные делятся на две группы: вероятности событий и законы распределения. Вероятности событий делятся на три подгруппы: 1) вероятности, характеризующие возможность возникновения аварийных режимов в СЭС; 2) вероятности, характеризующие возможность отказа АЗ; 3) вероятности касаний людьми ТВЧ электроустановок. Вторая группа данных представлена законами распределения тока через тело человека.

К неопределенной относится информация, содержащаяся в характеристиках срабатывания АЗ и характеристиках перегжога проводов. Они имеют вид функций, зависящих от тока КЗ. При этом каждое значение такой функции имеет «разброс», описывающийся как неопределенный интервал.

Особенностью вероятностных исходных данных (вероятностей событий) является невозможность определения их истинных значений. Технология их получения опирается на использование статистической информации, позволяющей определить частоты событий, являющиеся точечными оценками истинных значений вероятностей. Такие оценки, являясь случайными величинами, могут существенно отличаться от оцениваемых вероятностей. Следовательно, получаемые на основе статистических методов оценивания значения вероятностей событий, учитываемых при моделировании СБЭ, следует рассматривать как вероятностно-неопределенную информацию.

Таким образом, часть вводимых при моделировании СБЭ исходных данных содержит интервально-неопределенную и вероятностно-неопределенную информацию (такие данные выделены на рисунках 2 и 3 тонированием).

Выявленный характер неопределенности части исходных данных предопределяет выбор методов описания и анализа неопределенности при моделировании и оптимизации СБЭ. Такие методы должны позволять решать следующие задачи: 1) описывать неопределенность исходных данных с помощью специальных математических конструкций (моделей неопределенности); 2) обеспечивать возможность выполнения арифметических операций с неопределенными и определенными величинами с последующим получением результатов, являющимися неопределенными величинами того же вида; 3) обеспечивать возможность сравнения результатов вычислений, являющихся неопределенными величинами, и выбора из группы таких величин тех, которые имеют наибольшее и наименьшее значение.

В первую очередь, предлагается использование методов интервального анализа. Они позволяют естественным образом описывать интервальную неопределенность защитных характеристик. Для описания вероятностно-неопределенных данных предлагается использовать в качестве неопределенного интервала доверительный интервал. В рамках интервального анализа существует математический аппарат, позволяющий производить с интервалами арифметические действия (включая действия с «обычными» числами). Наконец, в рамках этого анализа имеются методы сравнения интервалов.

Для решения поставленных задач предлагается также использование теории нечетких множеств (ее подраздела, использующего нечеткие числа). С помощью нечетких чисел может быть описана вероятностно-неопределенная информация, с нечеткими числами можно выполнять арифметические действия, нечеткие числа можно сравнивать по величине.

Таким образом, в качестве методов описания и анализа неопределенности исходных данных при решении задачи оптимизации СБЭ нами выбраны интервальный анализ и подраздел теории нечетких множеств «нечеткие числа».

В третьей главе описана разработка методов моделирования электропожаробезопасности с учетом неопределенности исходных данных. В первую очередь произведена разработка методов учета интервальной неопределенности защитных характеристик. Предложено описывать интервальную неопределенность таких характеристик с помощью интервальных функций. Каждому значению аргумента такой функции x отвечает интервал неопределенных значений аргумента $\Delta f(x)$. Совокупности нижних и верхних границ неопределенных интервалов описываются с помощью двух однозначных граничных функций $f^H(x)$ и $f^B(x)$. На их основе строятся уровневые однозначные интервальные функции, определяемые параметром ω , изменяющимся на отрезке $[0,1]$. Граничные значения этого параметра отвечают граничным функциям.

Моделирование электробезопасности при интервальной неопределенности защитных характеристик предусматривает определение неопределенных интервалов времен срабатывания каждого из АЗ при токах КЗ в «концах» участков сети. Совокупность таких интервалов образует пространство неопределенности, порождаемое защитными характеристиками. Для его дискретизации целесообразно выбрать такие точки пространства, в которых достигается наименьшая и наибольшая опасность электропоражений на объекте. Положение таких точек будет определяться выбором граничных функций характеристик. Моделирование электробезопасности будет достаточно осуществить только для реализаций неопределенности, отвечающих этим функциям. В результате моделирования (при неизменности вероятностных данных) будут получены неопределенные интервалы значений вероятностей электропоражений. Далее на их основе с помощью интервальной арифметики могут быть подсчитаны неопределенные интервальные интегральные показатели электробезопасности, являющиеся аналогами показателей, приводимых на рисунке 1.

Моделирование пожаробезопасности предусматривает одновременное использование характеристик пережога и защитных характеристик. На каждом из участков сети учитывается диапазон токов КЗ, отвечающих возможным расположениям точек КЗ на этом участке. Каждому значению тока отвечает неопределенный интервал значений длительностей пережога и неопределенный интервал значений длительностей срабатывания соответствующих АЗ. Пространство неопределенных факторов, выступающее в роли исходных

данных при моделировании пожаробезопасности, представляет собой пересечение двух пространств, имеющее одновременно «токовое» и «временное» измерения.

Расчет пожаробезопасности базируется на определении точки пересечения характеристики пережога и защитной характеристики для каждого участка сети. Наличие интервальной неопределенности двух видов характеристик приводит к появлению области их пересечения. Проекция этой области на ось токов образует неопределенный интервал значений общих точек пересечений. В области пересечения характеристик проявляется «третичная» неопределенность исходных данных, состоящая в неопределенности возникновения состояния пережога.

Область пересечения интервально-неопределенных характеристик включает в общем случае три характерных зоны токов: зону гарантированного пережога (ЗГП), зону возможного пережога (ЗВП) и зону защиты (ЗЗ). Первая и третья зоны могут иметь различное чередование в пределах диапазона токов КЗ на участке сети.

Для практической реализации моделирования пожаробезопасности пространство неопределенных факторов необходимо дискретизировать. Для этого необходимо произвести анализ рассматриваемых исходных данных на уровень пожаробезопасности на объекте. Установлено, что наименьшая (наибольшая) опасность «электропожаров» на объекте достигается при наименьших (наибольших) длинах зон пережога на участках сети.

При определении длины зоны пережога следует принимать во внимание, что в зоне возможного пережога (для всех значений токов) могут быть выделены как сочетания реализаций неопределенных факторов, вызывающих пережог, так и сочетания, не вызывающие это явление. В силу «третичной» неопределенности ЗВП может одновременно рассматриваться и как зона пережога, и как зона защиты.

При наличии на участке сети трех характерных зон токов минимальная длина зоны пережога отвечает длине ЗГП, а максимальная – сумме длин ЗГП и ЗВП. При отсутствии на участке сети ЗГП минимальная длина зоны пережога равна нулю, а максимальная – длине ЗВП. При наличии на участке сети только ЗВП минимальная длина зоны пережога принимается равной нулю, а максимальная – длине диапазона токов КЗ на этом участке. На практике возможны частные случаи отсутствия пересечений характеристик. В одном из них (при отсутствии пережога) длина интервала ЗВП принимается равной нулю, в другом (при наличии пережога во всех точках интервала) – равной длине диапазона токов КЗ. Неопределенные длины (границы) интервалов пережога образуют «четвертичную» интервальную неопределенность исходных данных.

В процессе последующего моделирования пожаробезопасности на основе двух задаваемых длин зон пережога производятся вычисления интервальных коэффициентов незащищенности, а затем – интервальных показателей пожарной опасности на участках сети. Далее на их основе с помощью

интервальной арифметики подсчитываются интервальные показатели пожарной опасности на объекте, учитывающие множество участков и различные виды КЗ.

Разработан метод учета неопределенности при моделировании пожаробезопасности, опирающийся на допущение о равномерном законе распределения времен пережога и срабатывания АЗ (при любом фиксированном значении тока КЗ). В сочетании с механизмом «бросания наугад» точки КЗ он позволяет на основе использования формулы полной вероятности определять среднее значение вероятности пережога на участке сети. Такое значение может использоваться на дальнейших уровнях моделирующего алгоритма таким же образом, как и значение вероятности пережога (коэффициента незащищенности) в исходном алгоритме моделирования без учета неопределенности.

Метод моделирования СБЭ при учете неопределенности исходных данных в аспекте электробезопасности на основе интервальной неопределенности предполагает описание вероятностей отказов АЗ и вероятностей ОЗК в виде неопределенных интервалов, построенных на основе известных достоверных интервалов для этих вероятностей. Дискретизация пространства неопределенных факторов осуществляется на основе учета того факта, что минимальная (максимальная) вероятность электропоражения людей на объекте достигается при минимальных (максимальных) значениях вероятностей отказа АЗ и минимальных (максимальных) значениях вероятностей ОЗК. Последнее позволяет выделить в пространстве неопределенных факторов по каждому виду вероятностей две граничные точки, обеспечивающие минимальное и максимальное значения вероятностей электропоражений людей на объекте. Алгоритм позволяет учитывать неопределенность как отдельных видов вероятностей, так сочетания их неопределенностей.

Метод моделирования СБЭ при учете неопределенности исходных данных в аспекте пожаробезопасности на основе интервальной неопределенности предполагает описание вероятностей отказов АЗ и четырех видов вероятностей КЗ в виде неопределенных интервалов, построенных на основе известных достоверных интервалов для этих вероятностей. Дискретизация пространства неопределенных факторов осуществляется на основе учета того факта, что минимальная (максимальная) вероятность электропоражения людей на объекте достигается при минимальных (максимальных) значениях вероятностей отказа АЗ и минимальных (максимальных) значениях вероятностей КЗ. Последнее позволяет выделить в пространстве неопределенных факторов по каждому виду вероятностей две граничные точки, обеспечивающие минимальное и максимальное значения показателей пожарной опасности для каждого участка сети. Алгоритм позволяет учитывать неопределенность как отдельных видов вероятностей, так сочетание их неопределенностей. Подсчет интегральных значений показателей электробезопасности ведется на основании правил интервальной арифметики.

Метод моделирования СБЭ при учете неопределенности исходных данных в аспекте электробезопасности на основе нечеткой неопределенности предполагает описание вероятностей отказов АЗ и вероятностей ОЗК в виде нечетких чисел. При этом полностью сохраняется технология моделирования электробезопасности в условиях определенности, а арифметические операции выполняются по правилам нечеткой арифметики. Результатами моделирования являются нечеткие вероятности электропоражений людей и строящиеся на их основе нечеткие интегральные показатели эффективности.

Метод моделирования СБЭ при учете неопределенности исходных данных в аспекте пожаробезопасности на основе нечеткой неопределенности предполагает описание вероятностей отказов АЗ и вероятностей четырех видов КЗ в виде нечетких чисел. В нем также сохраняется технология моделирования пожаробезопасности в условиях определенности.

При моделировании СБЭ используется обширный перечень недетерминированных исходных данных, обладающих различными степенями неопределенности. Различные варианты таких данных порождают задачу выбора возможных сочетаний вариантов неопределенности. Введена позиционная иерархическая система обозначений вариантов исходных данных, позволяющая описывать характер неопределенности вводимых данных.

В четвертой главе описываются разработанные методы оптимизации СБЭ в условиях неопределенности исходных данных, программное обеспечение этих методов и вопросы их практической реализации.

К методам оптимизации предъявляются требования сохранения логики имеющихся методов и возможности оперирования с интервальной и нечеткой неопределенностью. При разработке методов решались задачи сравнения неопределенных частных критериев оптимальности, задачи построения неопределенного аддитивного скалярного критерия и задачи выбора экстремального значения неопределенного критерия оптимальности.

При решении задачи сравнения значений критериев с интервальной неопределенностью используется метод, основанный на детерминированных операциях непрерывной логики, определяющий понятие сравнимости интервалов и позволяющий построить алгоритм выделения экстремальных интервалов. Рассмотрим пример расположения интервальных значений критерия оптимальности (рисунок 4).

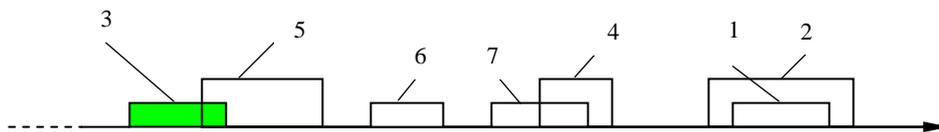


Рисунок 4 - Пример расположения интервальных значений критерия оптимальности

Будем считать, что критерий оптимальности являются минимизируемым. Чтобы в системе интервалов некоторый интервал был минимальным, необходимо и достаточно, чтобы его левая граница была минимальной из

всех левых границ и чтобы его правая граница была минимальной из всех правых границ. На рисунке 4 это условие выполняется для интервала, отвечающего третьему варианту СБЭ. В примере значения критериев для третьего и пятого вариантов системы имеют область пересечения, называемая интервалом неразличимости (толерантности) критериев.

Далее в главе рассмотрен метод построения интервального векторного критерия оптимальности, предусматривающий выполнение процедуры нормирования частных интервальных критериев и их последующее суммирование. Для построенного критерия используется та же логика выделения экстремальных интервалов.

При решении задачи сравнения значений критериев при нечеткой неопределенности используется метод сравнения интервалов для выделенных уровней принадлежности нечетких чисел.

Рассмотрим пример расположения нечетких значений критерия оптимальности (рисунок 5). Значения критериев описаны в виде треугольных нечетких чисел. Условие минимальности нечеткого критерия оптимальности выполняется для третьего варианта системы.

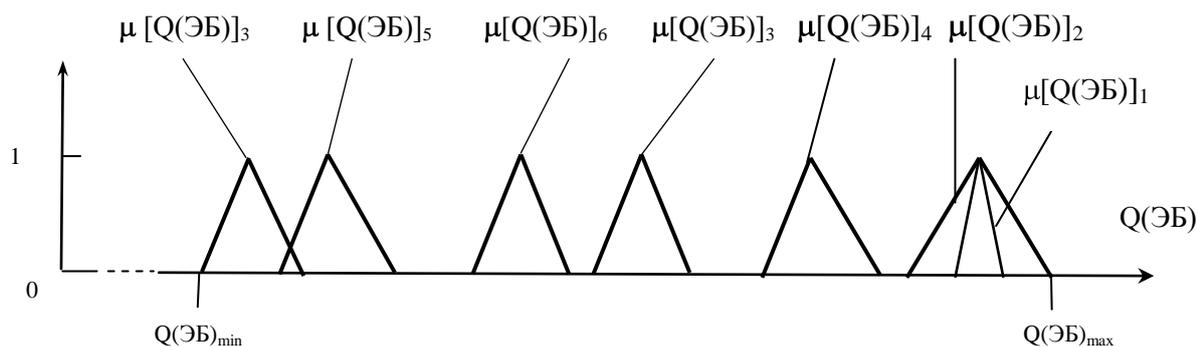


Рисунок 5 - Пример совокупность нечетких значений критериев оптимальности СБЭ в аспекте электробезопасности

Далее в главе рассмотрен метод построения нечеткого векторного критерия оптимальности, предусматривающий выполнение процедуры нормирования частных нечетких и их последующее суммирование. Для построенного критерия используется логика выделения экстремальных интервалов, учитывающая уровни принадлежности.

Для решения задач оптимизации СБЭ в условиях неопределенности разработан многофункциональный программный комплекс «Электропожаробезопасность 380/220 Н» (Версия 2). В новой версии комплекса учтены все новые методы моделирования и оптимизации электропожаробезопасности.

С целью проверки работоспособности разработанных методов моделирования и оптимизации СБЭ в условиях неопределенности, а также разработанного программного обеспечения был произведен автоматизированный выбор оптимального варианта СБЭ на конкретном объекте. Рассматривались 4 варианта СБЭ. Для них были рассчитаны различные варианты интеграль-

ных показателей пожарной опасности (ИППО), имеющих как интервальный, так и точечный характер (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты расчетов показателей пожарной опасности

Расчетный вариант сети	№ вар. СБЭ	Интервал ИППО	ИППО С-С	ИППО С-Н	ИППО по Лапласу	Расширенный интервал ИППО
Исходная схема	1	[0,121 ; 0,264]	0,175	0,263	0,210	[0,102 ; 0,303]
С выкл. ВА «С»	2	[0,021 ; 0,273]	0,026	0,260	0,134	[0,018 ; 0,312]
С выкл. ВА «В»	3	[0,003 ; 0,270]	0,006	0,260	0,132	[0,002 ; 0,311]
С предохранит.	4	[0,051 ; 0,152]	0,063	0,144	0,117	[0,043 ; 0,175]

Значения интервальных показателей пожарной опасности, подсчитанных при определенных значениях вероятностей КЗ, приведены на рисунке 6.

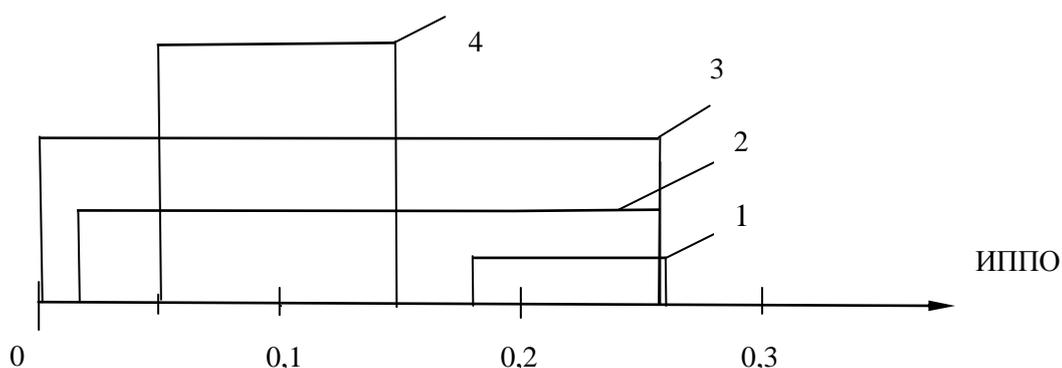


Рисунок 6 – Значения интегральных показателей пожарной опасности

Выделение экстремального (минимального) интервала, позволяющего на основе методов интервального анализа определить оптимальный вариант СБЭ, среди заданного набора вариантов систем оказывается невозможным. Пример иллюстрирует влияние неопределенности исходных данных на решение задачи оптимизации СБЭ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Одной из проблем проведения оптимизационных расчетов СБЭ является неопределенный характер части исходных данных. Это обуславливает неопределенность рассчитываемых показателей эффективности системы безопасности и результатов выбора оптимального варианта СБЭ.

2. Для обеспечения достоверности оптимизационных расчетов могут использоваться методы моделирования и оптимизации СБЭ, учитывающие характер неопределенности исходных данных, сохраняющие логику модели-

рования электропожаробезопасности и позволяющие сравнивать значения неопределенных критериев оптимизации.

3. Математический аппарат для решения задачи оптимизации СБЭ в условиях неопределенности, должен позволять решать совокупность трех задач: 1) описание неопределенности исходных данных, 2) выполнение алгебраических операций с промежуточными данными моделирующих алгоритмов, 3) сравнение рассчитанных неопределенных значений критериев оптимальности. Таким требованиям удовлетворяют аппараты интервального анализа и теории нечетких множеств.

4. При моделировании систем безопасности электроустановок целесообразно выделять две группы неопределенных исходных данных, в первую из которых входят характеристики срабатывания аппаратов защиты и характеристики пережога, во вторую - вероятности возникновения аварийных режимов в электроустановках и вероятности, характеризующие надежность аппаратов защиты.

5. При моделировании электробезопасности с учетом влияния неопределенности защитных характеристик необходимо осуществить дискретизацию пространства неопределенных факторов и производить вычисления показателей электробезопасности в таких его точках, для которых показатели эффективности системы электробезопасности достигает своего наименьшего и наибольшего значения.

6. При моделировании пожаробезопасности с учетом влияния неопределенности защитных характеристик и характеристик пережога необходимо осуществить дискретизацию пересечения пространств неопределенных факторов с учетом условий возникновения пережога на участках сети, определяющих на оси токов КЗ зоны возможного и гарантированного пережога. Вычисления показателей пожарной безопасности целесообразно производить в таких точках пространства неопределенности, определяемого указанными зонами, для которых показатели эффективности системы пожаробезопасности достигают своего наименьшего и наибольшего значения.

7. При моделировании электробезопасности и пожаробезопасности с учетом интервальной аппроксимации неопределенности вероятностных исходных данных, необходимо осуществить дискретизацию пространства неопределенных факторов и производить вычисления показателей электробезопасности и пожаробезопасности в таких его точках, для которых показатели эффективности системы электробезопасности достигает своего наименьшего и наибольшего значения.

8. При моделировании электробезопасности и пожаробезопасности с учетом аппроксимации неопределенности вероятностных исходных данных в виде нечетких чисел на основе правил нечеткой арифметики осуществляется подсчет показателей электробезопасности и пожаробезопасности, имеющих вид нечетких чисел. Такое моделирование осуществляется при фиксированных реализациях неопределенности характеристик срабатывания и пережога.

9. Многообразие возможных сочетаний неопределенности исходных данных порождает проблему учета таких сочетаний. Для ее решения разработана позиционная иерархическая система обозначений вариантов неопределенности исходных данных.

10. Разработан метод оптимизации СБЭ в условиях неопределенности, учитывающий интервальное описание значений частных критериев оптимальности и векторного критерия оптимальности.

11. Разработан метод оптимизации СБЭ в условиях неопределенности, учитывающий нечеткое описание значений частных критериев оптимальности в форме нечетких чисел, а также нечеткое описание векторного критерия оптимальности.

12. Моделирование и оптимизация СБЭ в условиях неопределенности может осуществляться с помощью разработанного интегрированного программного комплекса.

Список основных публикаций по теме диссертационной работы

В изданиях по перечню ВАК

1. Германенко, В.С. Средства реализации выбора оптимальных стратегий создания систем безопасности электроустановок АПК [Текст] / В.С. Германенко, С.С. Гусельников, О.Н. Дробязко, С.Ф. Нефедов // Ползуновский вестник.- 2005. -№ 4.-Ч.3. - С. 230-234.

2. Нефедов, С.Ф. Построение оптимальных систем безопасности электроустановок зданий с учетом степени неопределенности исходной информации [Текст] / С.Ф. Нефедов, О.Н. Дробязко // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 2009. -№ 5. - С. 6-7.

3. Дробязко, О.Н. Особенности использования методов оценки эффективности и оптимизации технических систем безопасности электроустановок [Текст] / О.Н. Дробязко, С.Ф. Нефедов // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 2009. -№ 5. - С. 32-33.

4. Дробязко, О.Н. Учет неопределенности исходных данных в задачах оценки эффективности систем безопасности электроустановок [Текст] / О.Н. Дробязко, С.Ф. Нефедов // Ползуновский вестник.- 2009.- № 4. – С. 26.

5. Дробязко, О.Н. Количественная оценка состояния электробезопасности в образовательных учреждениях/ О.Н. Дробязко, С.Ф. Нефедов // Ползуновский вестник, -2009. -№ 4.- С. 34.

6. Нефедов, С.Ф. Основы построения программного обеспечения оценки эффективности систем безопасности электроустановок в условиях неопределенности [Текст]/С.Ф Нефедов //Ползуновский вестник.- 2009.-№ 4.-С.37.

В других изданиях

7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610714. Расчет пожарной опасности дуговых коротких замыканий (СКЭД-380) [Текст] / Дробязко О.Н, Сошников С.А., Гусельников С.С., Не-

Нефедов С.Ф. // Заявка № 2005613451; дата поступления 26.12.2005 г.; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.02.2006.

8. Дробязко, О.Н. Дополнительные критерии выбора электрической защиты в сетях 0,38 кВ [Текст] / О.Н. Дробязко, С.Ф. Нефедов // Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера- приоритетные направления обеспечения социальной безопасности населения Юга Западной Сибири. Материалы V международной научно-технической конференции. Вып. 12. -Барнаул: Азбука. 2007. - 345 с. – С.241-242.

9. Сошников, А.А. Перспективы использования методов оценки эффективности и оптимального выбора систем безопасности электроустановок на объектах АПК [Текст] / А.А. Сошников, О.Н. Дробязко, С.Ф. Нефедов // Вестник Алтайского научного центра Сибирской академии наук высшей школы, -2009.-№ 9.-С. 82-85.

10. Козлов, Л.А. Создание и внедрение систем автоматизированного проектирования электрической защиты на объектах АПК [Текст] / Л.А. Козлов Л.А., О.Н. Дробязко, С.Ф. Нефедов // Вестник Алтайского научного центра Сибирской академии наук высшей школы, -2009.-№ 9.-С.25-30.

11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009614829. Электробезопасность 380/220 (ЭБ 380/220) [Текст] / Дробязко О.Н., Нефедов С.Ф. // Заявка № 2009613691; дата поступления 13.07.2009 г.; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07.09.2009 г.

12. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2010610102. Электропожаробезопасность 380/220 Н (ЭПБ 380/220 Н) / Дробязко О.Н., Нефедов С.Ф. // Заявка № 2009615789; дата поступления 20.10.2009 г.; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.01.2010.

13. Никольский, О.К. Комплексная система обеспечения безопасности электроустановок сельских населенных пунктов. Методические и практические рекомендации [Текст] / О.К. Никольский, А.А. Сошников, О. Н. Дробязко, Т.В. Еремина, С.А. Сошников, Ю.С. Лукьянов, С.Н. Серов, Б.С. Компанец, С.Ф. Нефедов, О.В. Полухин; под ред. А.А. Сошникова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011.-112 с.