

На правах рукописи



Калинин Александр Фёдорович

**ОЦЕНКА И УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫМ РИСКОМ
ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НА ПРЕДПРИЯТИЯХ
АПК В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ**

Специальность 05.20.02 – «Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Улан-Удэ – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» (г. Улан-Удэ)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Ерёмина Тамара Владимировна

Официальные оппоненты: **Сидоров Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск.

Зайнишев Альфред Варисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (Институт агроинженерии), г. Челябинск.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Защита состоится **«04» декабря 2015 года в 10⁰⁰** часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр-кт Ленина, 46, тел/факс +7 (3852) 36-71-29, сайт: <http://www.altstu.ru>; электронный адрес: elnis@inbox.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет им. И.И. Ползунова» и на сайте http://www.altstu.ru/media/f/Dissertaciya_Kalinin.pdf.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью Вашего учреждения, просим направить по указанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета и e-mail: a.k.brit@mail.ru.

Автореферат разослан **«06» октября 2015 г.**

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



Куликова Лидия Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение интенсификации сельскохозяйственного производства и улучшение качества жизни сельского населения являются приоритетными в развитии аграрного сектора экономики страны. В связи с этим проблема снижения техногенных угроз, повышения эксплуатационной надёжности и безопасности электроустановок (ЭУ), увеличения остаточного ресурса технологического электрооборудования представляется в настоящее время актуальной. Особенно остро стоит эта проблема в результате старения основных фондов отрасли, износ которых превысил критический уровень. Количественным показателем, наиболее полно характеризующим техническое состояние и остаточный ресурс ЭУ объектов агропромышленного комплекса (АПК), по нашему мнению, является риск опасности (техногенный риск R). Как правило, основой объективной оценки рисков ЭУ могут служить натурные эксперименты, проведение которых сдерживается гуманитарными и экономическими причинами. Получение априорных оценок рисков аварий, электротравм и пожаров в ЭУ наталкивается на принципиальные трудности, вызванные неопределённостью функционирования человеко-машинной системы (ЧМС). Эта неопределённость проявляется в неполноте, неточности или недостоверности информации об условиях и параметрах компонентов ЧМС «человек – электроустановка – среда» (Ч-ЭУ-С). Отсутствуют также методы априорного количественного моделирования ЧМС в реальном масштабе времени в связи со сложной структурой и многоцелевым характером функционирования системы, наличием информационных и энергетических связей компонентов с нелинейными характеристиками, наличием нормативных и экономических ограничений. Поэтому традиционные методы идентификации не могут быть положены в основу моделирования такой сложной динамической системы, какой является ЧМС (Ч-ЭУ-С).

Отсутствие методов диагностики технического состояния ЭУ приводит к тому, что персоналу приходится принимать интуитивные решения по предотвращению опасных техногенных ситуаций, своевременно отключать электроустановку и выводить оборудование на профилактику или в ремонт.

Таким образом, разработка метода оценки и прогнозирования техногенного риска ЭУ является важной и своевременной, его реализация позволяет повысить эффективность диагностики технического состояния ЭУ и определить её остаточный ресурс.

Степень проработанности темы. 1. Решению проблемы безопасности электроустановок (электрической, электромагнитной и пожарной) посвящено много работ, в основе которых лежат детерминистические и вероятностные методы исследования. Сущность этих работ состоит в детальном анализе обстоятельств, причин аварий и несчастных случаев, расчёте показателей производственного электротравматизма, параметров надёжности электрических

сетей и технологического электрооборудования, определении вероятностей аварий и электротравм и экономического ущерба от них. Вместе с тем отсутствие единой методологической концепции оценки и прогнозирования рисков не позволяет принимать верные эффективные решения, направленные на обеспечение надёжности и безопасности электроустановок объектов АПК.

Разработка метода многопараметрического анализа человеко-машинной системы (Ч-ЭУ-С) является основой создания экспертной системы (ЭС) для оценки и прогнозирования техногенных рисков ЭУ. С помощью ЭС представляется возможным учитывать ошибки персонала при эксплуатации технологического электрооборудования, отказы электроустановок и негативные воздействия факторов внешней среды.

Работа выполнена в соответствии с Концепцией развития аграрной науки и научного обеспечения АПК России до 2025 года (МСХ РФ, приказ от 25 июня 2007 г. №342).

Целью работы является повышение эффективности диагностики технического состояния ЭУ объектов АПК на основе прогнозирования и управления интегральным риском системы Ч-ЭУ-С.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

1. Провести анализ оценки и моделирования рисков ЭУ и обоснование лингвистической модели формирования и развития опасных техногенных ситуаций.

2. Обосновать концепцию интегрального риска опасности при функционировании человеко-машинной системы (Ч-ЭУ-С) в условиях неопределённости.

3. Разработать имитационную модель для интегральной оценки локальных рисков на производственном объекте при возникновении независимых опасных событий в ЭУ.

4. Обосновать метод оптимизации интегрального риска техногенной опасности ЭУ.

5. Разработать базу знаний и механизм принятия решений для экспертной системы диагностики технического состояния ЭУ применительно к реальному объекту АПК.

Идея работы. Эффективную диагностику состояния и прогнозирования техногенной безопасности следует проводить на основе анализа компонентов ЧМС (Ч-ЭУ-С), позволяющего учитывать ошибки персонала, отказы ЭУ и деструктивное влияние внешней среды, приводящих к возникновению аварий, электротравматизма и пожаров.

Научная новизна работы состоит:

1. В обосновании концепции интегрального риска электроустановок объекта, учитывающей вероятность возникновения опасного техногенного события и его последствий. Интегральный риск R_{Σ} включает в себя социальный, материальный и экологический ущербы, выраженные в едином денежном эквиваленте.

2. В разработке методологии принятия решения по управлению техногенным риском в условиях неопределённости, обусловленной

недостаточностью исходных данных, вероятностной природой функционирования ЧМС и невозможностью количественной оценки рискообразующих факторов (РОФ).

3. В определении наиболее информативных РОФ ЧМС, построении имитационной модели формирования и развития техногенных опасностей в реальном объекте, что приобретает особую значимость при отсутствии надёжной статистической базы и достоверных знаний о системе Ч-ЭУ-С и адекватности её описания.

4. В разработке базы знаний и механизма принятия решений для экспертной системы диагностики технического состояния электроустановок производственного объекта.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Разработанный метод оценки и прогнозирования интегрального риска позволил определить сценарии развития опасных техногенных ситуаций, происходящих в электроустановках.

Разработанный алгоритм построения оптимального риска R_{Σ} является основой для проектирования эффективной и экономически целесообразной системы обеспечения безопасности электроустановок.

Разработанные новые технические средства защиты ручных электрических машин позволяют предотвратить случаи электропоражения и снизить уровень профессиональной заболеваемости работников АПК.

Методология и методы исследования. Общая теория систем и системный анализ, исследование операций, методы математического моделирования, методы оптимизации, теория принятия решений, теория нечётких множеств.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция интегрального риска электроустановки в основе которой лежит двухпараметрическая стохастическая модель, сочетающая в себе как вероятность опасного события, так и его последствия: социальный, материальный и экологический ущербы, выраженные в едином денежном эквиваленте, что позволяет применить механизм оценки экономической эффективности при оптимизации системы безопасности ЭУ.

2. Имитационная модель, построенная с учётом рискообразующих факторов компонентов системы «человек – электроустановка – среда», позволяет анализировать возникновение опасных техногенных ситуаций, вызванных отказами (авариями) электроустановок, ошибками и неправильными действиями персонала и неблагоприятными воздействиями рабочей и внешней среды.

3. Экспертная система диагностики технического состояния электроустановки для определения её остаточного ресурса, содержащая программный модуль для предварительной обработки исходных данных и последующего формирования базы знаний, обеспечивает функцию управления интегральным риском для поиска его приемлемого (нормативного) значения в условиях неопределённости.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением результатов имитационного моделирования ЧМС с полученными данными экспертной системой диагностики технического состояния электроустановок при

проведении вычислительных экспериментов. Основные материалы и результаты работы представлялись и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (Улан-Удэ, 2012, 2013, 2014 гг.), и Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (Барнаул, 2014, 2015 гг.), а также на VIII, XVII, XXX международных заочных научно-практических конференциях «Научная дискуссия: вопросы технических наук» (Москва, 2013, 2015 гг.); на международной научно-практической конференции «European Science and Technology: 6th International scientific conference» (Мюнхен, Германия 2013 г.), на международной научно-практической конференции «Innovation processes in the context of globalization of the world economy: Challenges, Trends, Prospects» (г. Прага, Чешская Республика, 2015 г.).

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы использованы: при разработке методических и практических рекомендаций «Анализ условий комплексной безопасности при эксплуатации ручных электрических машин на объектах сельского хозяйства Республики Бурятия», «Оценка и прогнозирование рисков опасности электроустановок на объектах АПК Республики Бурятия», одобренных Министерством сельского хозяйства и продовольствия Республики Бурятия, а также государственной инспекцией труда Республики Бурятия; в учебном пособии «Теория и практика управления техногенными рисками электроустановок» для подготовки магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, формировании и доказательстве научных положений, разработке моделей и алгоритмов принятия решений в условиях неопределённости, создании превентивных мер безопасности ЭУ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Научные положения, приведенные в диссертации, соответствуют специальности 05.20.02 – «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве», в частности области исследования «Разработка новых методов и технических средств для снижения электротравматизма людей в условиях производства и быта».

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы автором в 19 печатных работах, в том числе в 11 статьях рецензируемых изданий, входящих в перечень ВАК, в двух патентах на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 116 наименований и 12 приложений. Объем работы составляет 155 страниц машинописного текста, включая 19 таблиц и 36 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе изложено состояние и перспективы применения нестационарных ЭУ (ручных электрических машин) в аграрном секторе. На основании анализа опасных техногенных ситуаций показана тенденция роста аварий в ЭУ, электротравматизма, возникновения пожаров, вызванных электрическим током. Проведена систематизация факторов эксплуатационной опасности ЭУ и причины возникновения техногенных угроз. Показано, что ручные электрические машины (РЭМ) являются наиболее опасными видами ЭУ, вызывающими электротравмы и профессиональные заболевания. Дан критический анализ современных методов исследования в области техногенной безопасности электроустановок. Отмечены ограниченные возможности детерминистического и статистического методов исследований, основанных либо на построении с серьезными допущениями функциональных моделей, либо на сборе значительных объёмом экспериментальных данных. Существенным недостатком широко распространенного статистического метода является невозможность решения плохо формализованных задач.

Решению проблемы обеспечения безопасности электроустановок напряжением 380/220В посвящены работы О.Н. Дробязко, Т.В. Ерёминой, О.К. Никольского, А.И. Сидорова, А.А. Сошникова и других. В основе этих работ лежит вероятностная концепция современной теории безопасности электроустановок, которая учитывает только фактор возникновения аварии или электропоражения. При этом, как правило, игнорируются возможные их последствия, приводящие к социальным потерям и материальным ущербам.

В данной работе развивается новый подход, основанный на рассмотрении и моделировании человеко-машинной системы (Ч-ЭУ-С), компонентом которой является человек, выступающий в роли объекта защиты (население, обслуживающее электроустановки) и субъекта – персонала, являющегося источником опасности в результате допущенных им ошибок или неправильных действий. (Согласно литературным источникам, человеческий фактор в настоящее время является основной причиной возникновения аварий и травматизма в сельском хозяйстве).

Показано, что имеются объективные трудности при принятии решений по управлению рисками опасности электроустановок производственного объекта. Эти трудности вызваны следующими факторами:

1. Низкой структурированностью, неопределённостью и физической неоднородностью компонентов рассматриваемой человеко-машинной системы.
2. Наличием многочисленных ограничений технологического, нормативного и экономического характера.
3. Случайными иницирующими предпосылками, приводящими к возникновению опасных техногенных ситуаций (ОТС).
4. Неопределённостью исходных данных и отсутствием точного

(удовлетворительного) описания возникновения и развития ОТС, что делает невозможным принятие адекватных оценок прогнозирования рисков. Неопределённость информации вызвана состоянием среды, обусловленной случайностью. Нечёткость и неясность является следствием субъективности процессов мышления человека и многообразия семантики и структуры естественного языка.

В диссертации сделан вывод о целесообразности разработки перспективного подхода к оценке исходной информации, имеющей неясную, неопределённую и вероятностную природу путем использования логико-лингвистического моделирования. Представление нечёткой информации с помощью такой модели является наиболее приемлемой для формализации знаний об объекте исследования и построения ЭС сценариев развития опасных техногенных ситуаций, возникающих на объектах АПК.

Вторая глава посвящена разработке метода оценки и управления техногенными рисками ЭУ сельскохозяйственных объектов. Показано, что среди используемых в настоящее время видов энергии наибольшую опасность представляет энергия электрического тока и электромагнитного поля, носителями которой являются ЭУ и системы электроснабжения.

Принято, что аварии, электротравмы и пожары происходят в результате возникновения инициирующих случайных событий (предпосылок), образующих причинно-следственные цепи. Введено понятие рискообразующего фактора, отражающего негативное проявление взаимосвязей ЧМС (Ч-ЭУ-С), проводящее к возникновению ОТС.

В основе решения практических задач, направленных на снижение (предупреждение) техногенных опасностей в ЭУ и их последствий, лежит методология оценки и управления рисками. Сущность этой методологии базируется на энергоэнтропийной концепции, в соответствии с которой опасность ЭУ следует рассматривать как результат неуправляемого выброса энергии, накопленной в технологическом электрооборудовании. Такой выброс энергии может приводить либо к преждевременным авариям, травматизму людей и пожарам, либо к ухудшению режимов работы ЭУ, например, к снижению качества электроэнергии. Показано, что возникновение опасных техногенных ситуаций и предаварийных режимов обусловлено ошибочными действиями персонала, отказами ЭУ и неблагоприятным воздействием внешней среды.

Изложена концепция техногенного риска электроустановки (ТРЭ), базирующаяся на универсальной трактовке риска как двухпараметрической модели. Эта модель учитывает вероятность (частоту) опасного события и последствия его реализации, представляющие ущерб, наносимый человеку, материальным объектам и среде обитания.

Введено понятие интегрального риска электроустановки R_{Σ} – показателя потенциальной опасности, учитывающего социальный, материальный и экологический ущербы, выраженные в едином денежном эквиваленте:

$$R_{\Sigma} = R(Y_C) + R(Y_M) + R(Y_{\mathcal{E}}), \quad (1)$$

где $R(Y_C)$, $R(Y_M)$ и $R(Y_{\Sigma})$ – риски социального, материального и экологического ущербов (Y_C , Y_M , Y_{Σ}).

Интегральный риск R_{Σ} (рисунок 1) следует трактовать как результат взаимодействия компонентов ЧМС.

Нарушение устойчивости функционирования системы Ч-ЭУ-С, вызванное накопленной энергией и её выбросом, приводит к реализации опасности вследствие скачкообразного или постепенного прироста энтропии в результате аварии ЭУ или по причине её старения и износа.

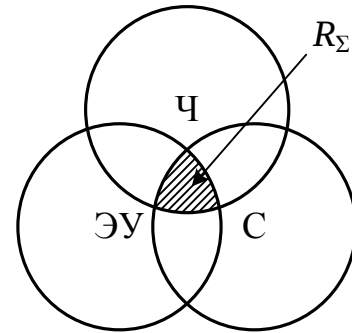


Рисунок 1– Иллюстрация интегрального риска

Для оценки ущерба предложено использовать, наряду с экономической шкалой количественных показателей, качественные: лингвистические и экспертные оценки.

Прямой (непосредственный) ущерб Y^I обусловлен утратой работоспособности ЭУ. Косвенный ущерб Y^K , являясь следствием прямого, отражает потери от разрушения связей между электроустановкой и потребителями электроэнергии.

Интегральный ущерб Y_{Σ} от ОТС на объектах АПК можно представить в виде суммы базовых составляющих:

$$Y_{\Sigma} = Y_{\text{ч}} + Y_{\text{о}} + Y_{\text{с}}, \quad (2)$$

где $Y_{\text{ч}}$ – ущерб человеку (населению, персоналу) медико-биологического характера (утрата здоровья и жизни);

$Y_{\text{о}}$ – ущерб техносфере, определяемый суммированием от повреждений и разрушения основных фондов инфраструктуры объектов электроэнергетики;

$Y_{\text{с}}$ – ущерб окружающей среде, обусловленный возникновением пожаров от ЭУ и опасными электромагнитными излучениями, включая упущенную выгоду и компенсационные затраты на ликвидацию неблагоприятных последствий для жизнедеятельности человека, животного и растительного мира.

Составляющие $Y_{\text{ч}}$, $Y_{\text{о}}$ и $Y_{\text{с}}$ интегрального ущерба выражают соответственно социальный, материальный и экологический виды ущербов. Тогда структура ущерба Y_{Σ} электроустановки может быть представлена в виде вектора многокомпонентного ущерба, который будет соответствовать i -му состоянию ЧМС (Ч-ЭУ-С):

$$Y_{\Sigma i} = \{Y_{\text{ч}}^I; Y_{\text{ч}}^K; Y_{\text{о}}^I; Y_{\text{о}}^K; Y_{\text{с}}^I; Y_{\text{с}}^K; Y_{\text{с}}^K\}. \quad (3)$$

Представленная структура интегрального ущерба даёт возможность учесть всё разнообразие ОТС в ЭУ и исключить двойной учет последствий, который может возникнуть, если выбранные виды ущербов будут перекрывать друг друга.

Целью анализа интегрального риска является определение частоты (вероятности) и последствия события, сочетание которых служит достаточным основанием признания факта объективного существования опасности ЭУ.

Процедура анализа риска включает следующие этапы:

1. Обоснование методологии, выбор и описание объекта исследования:

Производится на основании концепции трёхкомпонентной человеко-машинной системы (Ч-ЭУ-С), характеризующей взаимодействие: а) с человеком (социальный фактор); б) с электроустановкой (техногенный фактор); в) с окружающей средой (экологический фактор).

2. Идентификация техногенных опасностей:

Опирается на инициирующие события, которые могут привести к негативным последствиям (электротравме, аварии, пожару): а) компонент «человек» представлен свойствами, характеризующими «надёжность» человеческого фактора; б) компонент «электроустановка» характеризуется параметрами надёжности и живучести (уязвимости); в) компонент «среда» – штатными или аварийными нагрузками, оказывающими негативное воздействие на функционирование системы.

3. Формирование перечня РОФ компонентов системы, приводящих к опасным техногенным ситуациям (см. рисунок 2).

4. Получение вероятностных характеристик опасных событий:

Определяется как количественно (в виде точечных или интервальных оценок), так и качественно (с помощью лингвистических переменных). Для определения частот используется либо сбор и анализ статистических данных, накопленных за определённый период эксплуатации объектов, либо методы прогнозирования с построением деревьев событий и отказов.

5. Анализ последствий (исходов):

Направлен на оценку ущербов (потерь), вызванных: а) простоем технологического оборудования и недоотпуском продукции из-за перерывов электроснабжения потребителей; б) компенсационными издержками вследствие возникших аварий и отказов электроустановок и пожаров; в) электротравматизмом людей с летальными или тяжёлыми исходами (потерей трудоспособности); г) потерей молокоотдачи у коров и привесов у животных на откорме, вызванных электропатологией; д) потерей электроэнергии в сетях из-за несимметрии нагрузок и наличия высших гармоник напряжения и тока.

6. Оценка риска:

Включает в себя анализ частот (вероятностей) и последствий, определение его уровня и сопоставление с нормативным (приемлемым) значением. В общем случае приемлемый риск должен сочетать в себе техногенные, социальные и экологические аспекты и представлять компромисс между стремлением повысить уровень безопасности электроустановки и экономическими возможностями его достижения.

7. Управление (обработка) риска:

Описывается процессами выбора и реализации мер, направленных на уменьшение или предотвращение R_{Σ} . В качестве методической основы управления рисками ЭУ может быть использована теория принятия решений (ТПР), целью которой является выбор наилучшей из числа имеющихся

альтернатив на этапах проектирования и эксплуатации ЧМС (Ч-ЭУ-С). Отличительная особенность ТПР состоит в том, что она позволяет, используя аналитические и информационные средства, формализовать процессы функционирования ЧМС в условиях неопределённости исходных данных и прогнозировать сценарии развития опасных техногенных ситуаций в электроустановках.

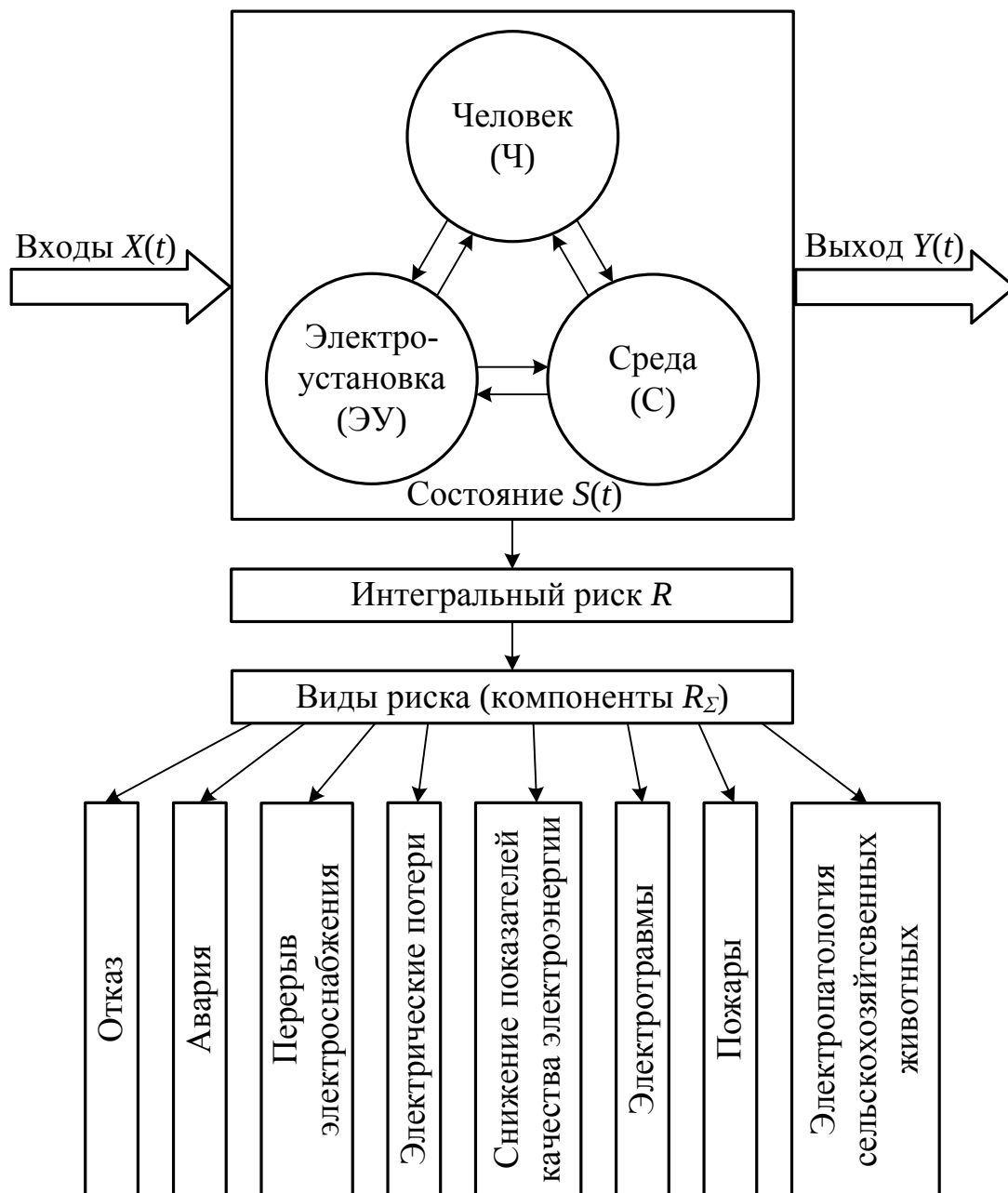


Рисунок 2 – Структурно-функциональная модель системы «человек – электроустановка – среда»

В диссертации построена модель развития ОТС в ЭУ:

$$P_{\Sigma}(t) = f_P[\chi(t), \text{ЭУ}(t), C(t)]; \quad (4)$$

$$Y_{\Sigma}(t) = f_Y[\chi(t), \text{ЭУ}(t), C(t)]. \quad (5)$$

где P_{Σ} – вероятность развития ОТС;

Y_{Σ} – ущерб от ОТС;

$Ч(t)$ – человеческий фактор; $ЭУ(t)$ – фактор электроустановки; $C(t)$ – фактор среды.

Модель характеризуется следующими возможными сценариями (рисунок 3): а) монотонным возрастанием интегрального риска до критического значения $R_{\Sigma КР}$ (кривая 1); б) резким изменением режимных параметров ЭУ (кривая 2); в) бифуркационными процессами, характеризующимися разделением тренда $R_{\Sigma}(t)$ и возникновением точек неустойчивости со сложными переходами изменения значений риска (кривая 3).

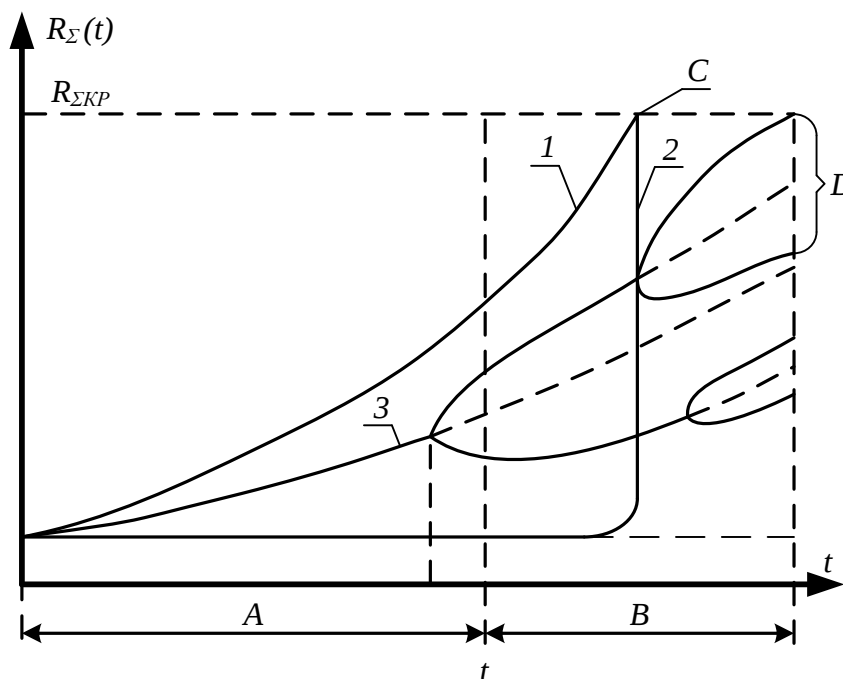


Рисунок 3 – Сценарии развития рисков электроустановок,
А – интервал наблюдения; В – интервал упреждения;
С – точечный прогноз; D – интервальный прогноз

Первый сценарий (кривая 1) описывает основной класс ЭУ зданий, работающих в штатном режиме. Последствия для этих ЭУ, как правило, предсказуемы, показатель риска изменяется по экспоненциальному закону. Для этого сценария характерен достаточный уровень определённости: статистические распределения и их числовые оценки известны, аппроксимирующей моделью может служить пуассоновский поток. Возможны среднесрочный (по годам) и краткосрочный (по месяцам) прогнозы.

Второй сценарий (кривая 2) характерен для энергонасыщенных ЭУ, ему свойственны возникающие отклонения от нормальных режимов эксплуатации. При этом сценарии возможно появление необратимых повреждений, аварий с ущербами и человеческими жертвами, обусловленных воздействием РОФ внешней среды. Сценарий практически не поддается априорному прогнозированию.

Здесь применимы либо методы вероятностного анализа ЭУ, основанные на определении вероятностей и числовых характеристик распределения по

имеющимся статистическим данным, либо проведение модельных экспериментов или имитационного моделирования.

Третий сценарий (кривая 3) развития риска характерен для сложных потенциально опасных электроустановок в результате воздействия человеческого фактора и внешней среды.

Этот сценарий является непредсказуемым с неизученным механизмом его формирования. Для него характерны высокая степень неопределённости и неоднозначности. Время упреждения практически равно нулю.

В третьей главе разработана имитационная модель (ИМ) формирования и развития опасных техногенных ситуаций (электротравм, аварий ЭУ и пожаров) применительно к объекту АПК. Сформулированы принципы построения рассматриваемой человеко-машинной системы. Показано, что оценка и прогнозирование риска ЭУ в условиях неопределённости относится к классу неформализованных задач, характеризующихся отсутствием адекватной математической модели и невозможностью получения количественных показателей. Поэтому ИМ, обладающая возможностью использования всей доступной информации вне зависимости от форм её представления, а также свойством объяснения сущности процессов, происходящих в ЭУ производственного объекта в реальном масштабе времени, позволяет получить адекватное описание функционирования системы Ч-ЭУ-С.

Рассмотренная модель (рисунок 4) представляет собой стохастическую сеть, в которой инициирующие события и соответствующие им предпосылки имеют случайный характер. Основание этой сети составляют компоненты ЧМС, которые генерируют РОФ. ИМ задается определённым числом входных параметров (РОФ), значения которых варьируются по заданному алгоритму для поиска приемлемого (оптимального) интегрального риска R_{Σ} (выходного параметра). При оценивании R_{Σ} полученная расчётная величина соотносится с допустимым (нормативным) уровнем. Учитывая отсутствие достоверных исходных данных и невозможность получения количественных оценок риска, в работе использованы методы, основанные на семантическом описании функционирования компонентов системы Ч-ЭУ-С.

Имитационная модель функционирования ЧМС представляется в виде обобщенного выражения:

$$M = \{X, Y, Z, S, T, q, h\}; \quad (6)$$

где $\left. \begin{array}{l} X = (x_1, x_2, \dots, x_n); \\ Y = (y_1, y_2, \dots, y_m); \\ Z = (z_1, z_2, \dots, z_p); \end{array} \right\}$ – пространства входных, выходных и возмущающих воздействий;

$S = (s_1, s_2, \dots, s_k)$ – пространство состояний системы в момент времени $t \in T$;

$T = (t_1, t_2, \dots, t_i)$ – множество моментов времени;

q – оператор переходов, отражающий изменение состояния системы под воздействием внутренних и внешних возмущений;

h – оператор выходов, описывающих механизм формирования выходного сигнала как реакции системы на внутренние и внешние возмущения.

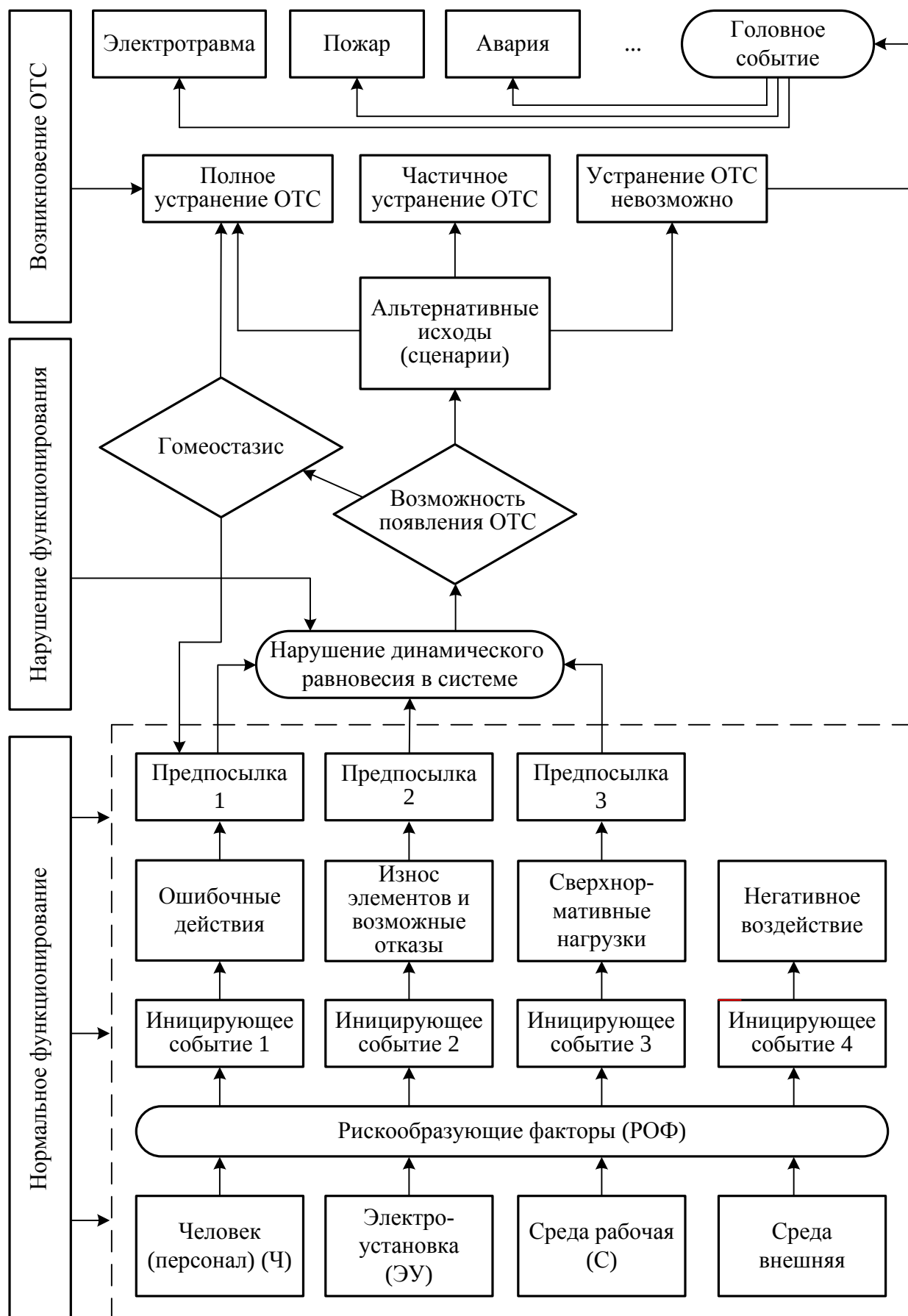


Рисунок 4 – Структурная схема имитационной модели функционирования человеко-машинной системы (Ч-ЭУ-С)

Входные воздействия $X(t)$ интерпретируются в виде заданных цели и функций, установленных интервалов времени и выделенных ресурсов, а также совокупности РОФ; выходное воздействие $Y(t)$ проявляется как полезные (или вредные) результаты функционирования ЧМС; возмущающие воздействия $Z(t)$ – негативные факторы внешней среды (сверхнормативные нагрузки, параметры микроклимата, социально-экономические условия); $S(t)$ – состояние системы в определённый интервал времени.

Состояние системы оценивается в виде динамического равновесия, при котором интегральные показатели находятся в гомеостазисе. Такое состояние целевых систем (с заданной целью) обуславливается стремлением их к устойчивости. Поскольку диапазон внешних воздействий на систему не может быть неограниченным, то и количество состояний (возмущений) должно быть достаточно ограниченным. Причём, ограничение этих состояний определяется соотношением между энергией внешнего возмущения и собственной энергоёмкостью системы.

В диссертации рассмотрены наиболее типичные состояния системы, характеризующиеся уровнем воздействия РОФ (низкое, допустимое, критическое и катастрофическое).

Совокупность РОФ компонентов человеко-машинной системы, включающих рабочую и внешнюю среду, представляет собой аналитическую сеть для оценки и прогнозирования интегрального риска R_{Σ} (рисунок 5).

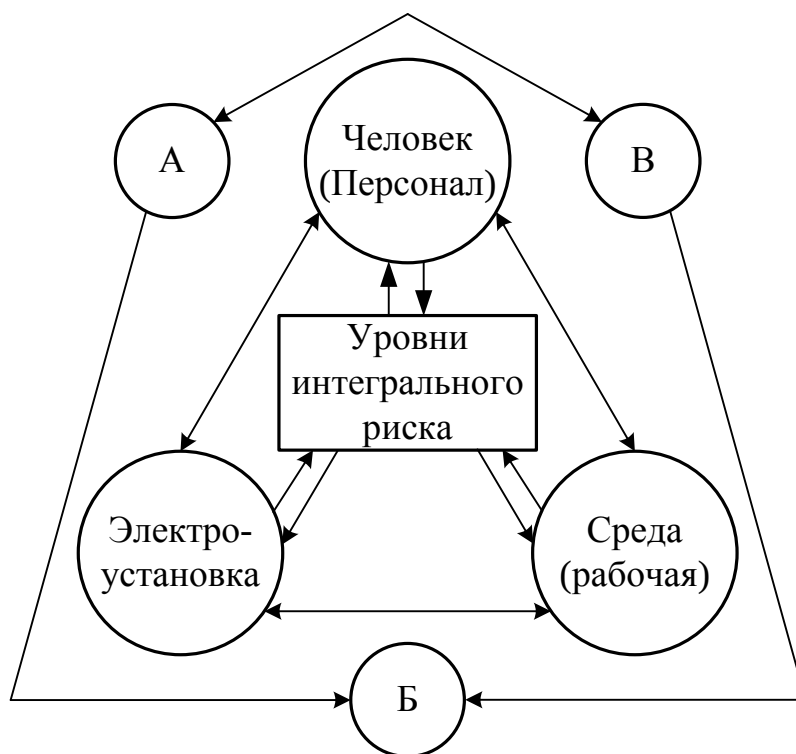


Рисунок 5 – Структурная схема аналитической сети:

А – законодательная и нормативно-техническая база;

Б – макроэкономические показатели; В – инновационные показатели

С помощью имитационного моделирования были установлены причинно-следственные связи между «входами» и «выходом» системы (см. рисунок 2)

путём семантического описания этих связей с применением лингвистических оценок и аппарата нечётких множеств.

Предложенная в диссертации лингвистическая оценка R_{Σ} в виде трёхмерной матрицы учитывает возможность (вероятность) наступления опасного техногенного события, длительность его воздействия на объект (ЭУ) или субъект (персонал) и последствие, характеризующее мерой тяжести этого события.

При проведении оптимизации риска R_{Σ} или построении оптимальной системы электробезопасности (СЭБ) в диссертации были сформулированы требования, обеспечивающие технико-экономические показатели эффективности системы при заданных реальных условиях её функционирования. Таким образом, с одной стороны выступают технические условия, нормативная и проектная документация, а с другой – материальные и финансовые ресурсы.

В общем виде задача оптимизации безопасности формулируется двояко:

а) при заданных затратах (экономических ограничениях) минимизировать показатель риска опасности;

б) при минимальных затратах обеспечить заданный (приемлемый, нормативный) уровень риска.

Указанные задачи допускают следующую формализованную постановку: пусть $R(X)$ – функция интегрального риска ЭУ и ЧМС от векторного аргумента X ($x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$), где x_i – i -ый рискообразующий фактор. Примем за $Q(X)$, функцию – вектор, определяющую полные затраты, состоящие из затрат на создание и функционирование СЭБ, остаточного (неустраненного) ущерба и компенсационных издержек.

Тогда математическая формулировка постановки задачи оптимизации может иметь вид:

1. Найти $\min R_{\Sigma}(X)$ при условии, что

$$Q(X) \leq Q_0; \quad (7)$$

2. Найти $\min Q(X)$ при условии, что

$$R_{\Sigma}(X) \leq R_{\Sigma 0}; \quad (8)$$

где Q_0 – заданные (приемлемые или нормативные) затраты;

$R_{\Sigma 0}$ – заданный (приемлемый или нормативный) интегральный риск.

Реализацию задачи оптимизации человеко-машинной системы (Ч-ЭУ-С) можно свести к выбору таких значений РОФ, при которых на этапе проектирования достигается минимум общих затрат при ограничениях на интегральный риск, либо на этапе эксплуатации достигается минимизация R_{Σ} при заданных ресурсных ограничениях и издержках.

В четвёртой главе представлена экспертная система (ЭС) диагностики технического состояния ЭУ реального объекта АПК. Приведено теоретическое обоснование метода нечёткой логики для построения ЭС.

В основу механизма принятия решения была положена нечёткая логико-лингвистическая модель вида:

$$LV = [L, T, X, G, M]; \quad (9)$$

где L – лингвистическая переменная;

T – множество ее значений (терм-множество);

X – универсальное множество нечетких переменных;

G – синтаксическая процедура образования новых термов, позволяющая из простых атомарных термов строить составные термы, $G: T \rightarrow T^*$, где T^* – расширенное терм-множество;

M – семантическая процедура, формирующая нечёткие множества для каждого терма T .

Нечёткая логико-лингвистическая модель (9) реализуется в экспертно-программном комплексе (рисунок 6), предназначенном для автоматизации расчётов техногенных рисков при проектировании систем безопасности ЭУ или принятии решений в процессе эксплуатации человеко-машинной системы.

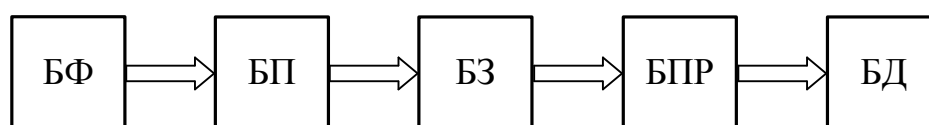


Рисунок 6 – Архитектура экспертно-программного комплекса
 БФ – блок фаззификации; БП – база правил; БЗ – база знаний;
 БПР – блок принятия решений; БД – блок дефаззификации

В архитектуре комплекса содержатся три основных блока, объединенных между собой логическими связями, отражающими реальное взаимодействие внутри моделируемой системы (Ч-ЭУ-С).

Экспертный блок представляет собой структуры данных, упорядоченные и классифицированные в соответствии с математической моделью. Являясь информационным ядром программы, блок содержит базу данных и базу знаний.

Блок управления выполняет функцию обработки управляющих сигналов от операционной системы и хранит в себе ядро взаимодействия между различными активными элементами самой программы.

Блок визуального представления, содержащий набор меню программы, диалоговые окна, инструменты ввода и т.д., обеспечивает графическую интерактивную часть программы и непосредственно осуществляет взаимодействие с пользователем.

ЭС, по существу, представляет собой модель поведения эксперта при принятии решений, т.е. обеспечивает персонал информацией о техническом состоянии ЭУ реального производственного объекта, включая интерактивное проведение диагностики причин нарушений и выбор необходимых действий по их устранению. При этом лицо, принимающее решение, опирается на базу знаний, представляющую собой структурированные и интерпретированные сведения, факты и правила, изложенные в системе нечёткой логики.

Исходными данными для построения экспертной системы является совокупность признаков компонентов человеко-машинной системы (РОФ), которые наиболее существенно влияют на создание ОТС, а также максимально возможные значения индикаторов соответствующего вклада в образовании ОТС

и лингвистические (в том числе балльные) оценки каждого РОФ. При этом распределение этих факторов на соответствующей универсальной шкале задаётся функцией принадлежности $\mu_{\Delta}(x)$ и лингвистической переменной.

Алгоритм определения R_{Σ} системы содержит следующие этапы:

1. *Формирование таблицы РОФ* компонентов системы для каждого кластера.

2. *Проведение экспертной оценки* – каждому РОФ (числу множества) задаётся смысловое выражение, присваивается соответствующий код и вес, вычисляется индикатор опасности (нормируемая оценка), выраженный числом, лежащим в интервале между 0 и 10 (их сумма должна быть равна 10).

3. *Введение лингвистической переменной* «значимость фактора риска» на основе трёхуровневой шкалы терм-множества значений типа («низкий» – Н, «средний» – С, «высокий» – В).

4. *Группировка полученной совокупности РОФ* по кластерам, характеризующим базовые показатели функционирования рассматриваемой ЧМС.

Каждый кластер формируется в соответствующий вектор:

а) компонент «человек»:

$$\bar{V}_ч = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}; \quad (10)$$

б) компонент «электроустановка»:

$$\bar{V}_{\text{ЭУ}} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}; \quad (11)$$

в) компонент «среда»:

$$\bar{V}_C = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_p\}. \quad (12)$$

где $n=1 \div 12$, $m=1 \div 8$, $p=1 \div 5$ – количество РОФ в компонентах системы Ч-ЭУ-С.

5. *Расчет рисков* по каждому компоненту ЧМС (кластеру):

$$R_K = \sum_{i=1}^S w_i r_i; \quad (13)$$

где w_i – значимость (вес) показателя ($\sum w_i = 1$);

S – количество РОФ, входящих в каждый кластер.

Значимость риска r_i определяется на основе ранжирования и свёртки.

6. *Расчёт интегрального риска* по принятой лингвистической переменной «Значимость фактора риска» с терм-множеством значений T_i для стандартного трёхуровневого классификатора с тремя функциями принадлежности $\mu_{ij}(x)$ треугольного вида по выражению:

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n w_i \sum_{j=1}^s \beta_j \mu_{ij}(x_i), \quad (14)$$

где w_i – вес i -го фактора в свертке;

β_i – узловые точки стандартного трёхуровневого классификатора,
 $\mu_{ij}(x_i)$ – значения функции принадлежности j -го качественного уровня.

В диссертации приведены результаты обследования технического состояния ЭУ объекта АПК – производственных корпусов птицефабрики «Компания Чикен-Дак» Алтайского края. Техническая диагностика осуществлялась на основе оценки и прогнозирования техногенных рисков с помощью экспертно-расчетных процедур.

По своей сути, идентификация собранных РОФ является исходной информацией для разработки иерархической базы знаний применительно к птицефабрике, построения деревьев риска возникновения событий (аварии, электротравмы, пожара) и применения логико-лингвистических правил типа «если-то» и «есть-нет». При этом влияющие факторы рассматриваются как лингвистические переменные, которые заданы на соответствующих универсальных множествах при помощи лингвистического терм-множества и сведены в граф (рисунок 7).

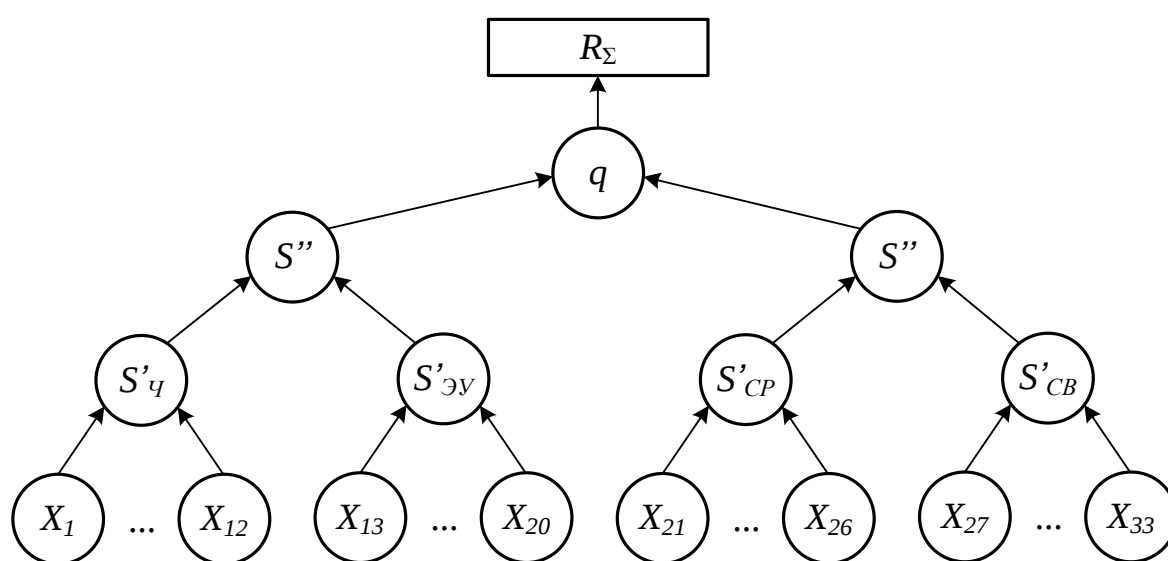


Рисунок 7 – Иерархическая структурная схема нечеткого логического вывода экспертной системы оценки интегрального риска электроустановок птицефабрики «Компания Чикен-Дак»

Структура графа отображает классификацию факторов по компонентам системы: «Человек» (Ч) – «Персонал», «Электроустановка» (ЭУ), «Среда рабочая» (Ср) и «Среда внешняя» (Св). Эти факторы влияют на прогнозируемый риск.

Разработанные структурные схемы развития опасных техногенных ситуаций в ЭУ птицефабрики при использовании лингвистических переменных, позволяют учитывать неточность входных данных и ненадёжность знаний. Неточность экспериментальных результатов обуславливается невозможностью получения идентичности проведения опытов, временными и ресурсными ограничениями. Ненадёжность знаний связана с отсутствием формальных процедур получения точных данных, их вероятностной природой, недостаточной математической обоснованностью правил определения техногенных рисков в ЭУ.

Построен алгоритм оценки и управления интегральным риском ЭУ птицефабрики, предусматривающий следующие этапы:

а) формирование входного вектора $X^*=\{X_1, \dots, X_{33}\}$ на основе логических сверток РОФ – переменных ($X_1 - X_{33}$);

б) введение нечёткой базы знаний типа Sugeno, обеспечивающей наибольшую линейность формирования выходных логических сверток для получения результатов нечёткого вывода.

Для моделирования многомерной зависимости «входы – выход» построена иерархическая система нечёткого логического вывода, в которой выходная переменная одной базы знаний низкого уровня является входной для другой базы знаний более высокого уровня.

Проведена настройка функций принадлежности в диапазоне изменения РОФ, обеспечивающая приемлемую нелинейность вычисления риска, что позволяет повысить точность моделирования и провести проверку адекватности.

Основные выводы и результаты исследований

1. Нормативными документами (Руководством по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» приказ Ростехнадзора от 13 мая 2015г. №188) предусматривается проведение анализа риска техногенной безопасности производственных объектов на различных этапах его жизненного цикла. Однако отсутствие эффективных методов технического состояния ЭУ на предприятиях АПК приводит к тому, что персоналу приходится принимать интуитивные решения по предотвращению аварий, электротравм и т.д. Возникшая проблемная ситуация обусловлена объективной сложностью проведения идентификации опасности человеко-машинных систем, функционирующих в условиях неопределённости.

2. Опасность ЭУ предложено оценивать с помощью техногенного риска, представляющего собой двухпараметрическую модель сочетания негативного события и его последствия (ущерб).

3. Эффективность функционирования человеко-машинной системы (Ч-ЭУ-С) в условиях неопределённости исходных данных может быть выражена с помощью интегрального риска (R_Σ) – комплексного критерия, представленного в виде единого денежного эквивалента, что позволяет применить механизм оценки экономической эффективности при проведении оптимизации системы безопасности электроустановок. В основу критерия R_Σ положено мультипараметрическое описание динамического состояния системы, учитывающее, наряду с параметрами надёжности, также факторы, характеризующие её безопасность, эргономичность и экономичность.

4. В основе концепции оптимизации интегрального риска в условиях неопределённости лежит выбор таких значений РОФ, при которых на этапе проектирования системы безопасности электроустановок минимизируются общие затраты при заданном (приемлемом или нормативном) значении R_Σ или минимизируется интегральный риск при заданных ресурсных ограничениях при эксплуатации ЭУ.

5. Разработанная имитационная модель возникновения техногенной ситуации на основе логико-лингвистических переменных позволяет построить графические диаграммы (деревья рисков) причинно-следственных связей между входными параметрами и R_{Σ} человеко-машинной системы.

6. Предложена лингвистическая оценка интегрального риска в виде трёхмерной матрицы, учитывающей возможность (вероятность) наступления опасного события, длительность воздействия факторов этого события на объект (электроустановку) или субъект (человека) и последствие, характеризующееся мерой тяжести этого события (материальный ущерб, социальные потери).

7. С целью автоматизации определения рисков для различных опасных ситуаций с учетом введенных РОФ (более 30) разработана экспертная система (ЭС), реализующая имитационную модель возникновения техногенных происшествий. ЭС содержит в своём составе модули для ввода исходных данных и предварительной обработки, формирования базы знаний, представляющей собой структурированные и интерпретированные сведения, факты и правила, изложенные в системе нечёткой логики и логического вывода, на основании которого делается заключение о техническом состоянии электроустановок объекта.

8. Разработанная ЭС использована для оценки риска опасных событий (аварии, электротравм и пожара) в электрохозяйстве птицефабрики Алтайского края (ООО «Компания Чикен-Дак»). Полученное значение интегрального риска электроустановок оценивается как высокое – $R_{\Sigma}=1,445 \cdot 10^{-3}$, выходящее за интервал допустимых значений $[10^{-5} \div 10^{-3}]$. Несоответствие нормативным требованиям техногенной безопасности объекта подтверждается так же анализом построенного дерева риска электротравмы с летальным исходом; значение локального риска составило порядка 10^{-3} .

Реализована функция управления интегральным риском электроустановок на предприятии путем проведения поэтапной итерации по умолчанию наиболее критичных РОФ: полученное значение $R_{\Sigma}=2,138 \cdot 10^{-4}$ соответствует среднему уровню риска и является допустимым в соответствии с нормативными требованиями.

Использование разработанной экспертной системы позволяет наиболее эффективно проводить диагностику технического состояния электроустановок на производственных объектах АПК, тем самым предупреждать возникновение аварий и электротравматизма и оптимизировать меры обеспечения безопасности человеко-машинных систем.

Основные научные положения диссертации опубликованы в работах

В изданиях по перечню ВАК

1. Ерёмина, Т.В. Вероятностная оценка электротравматизма при эксплуатации средств малой механизации [Текст] / Т.В. Ерёмина, А.Ф. Калинин, Д.С. Шурыгин // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – №2. – С. 36-40.

2. Ерёмина, Т.В. Метод математического моделирования травмоопасных ситуаций при эксплуатации ручных электрических машин [Текст] / Т.В.

Еремина, **А.Ф. Калинин** // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2013. – № 11. – С. 292-296.

3. Ерёмина, Т.В. Выбор эффективной электрозащиты средств малой механизации [Текст] / Т.В. Еремина, **А.Ф. Калинин** // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 1. – С. 53-56.

4. Ерёмина, Т.В. Выбор средств защиты ручных электрических машин [Текст] / Т.В. Еремина, **А.Ф. Калинин** // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2014. – №2. – С. 14-16.

5. Ерёмина, Т.В. Основные направления использования средств малой механизации в сельском хозяйстве [Текст] / Т.В. Еремина, **А.Ф. Калинин** // Ползуновский Вестник. – 2014. – №4. – С. 136-139.

6. Ерёмина, Т.В. Дуальная природа риска и схемы его оценки в условиях неопределенности [Текст] / Т.В. Еремина, **А.Ф. Калинин**, О.К. Никольский, А.Ф. Костюков, Г.А. Гончаренко // Вестник ВСГУТУ. – 2015. – №1. – С. 23-29.

7. Ерёмина, Т.В. Методология оценки интегрального риска опасности электроустановок объектов агропромышленного комплекса [Текст] / Т.В. Еремина, **А.Ф. Калинин** // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – №6. – С. 103-108.

8. Ерёмина, Т.В. Применение теории нечётких множеств к построению моделей риска электроустановок [Текст] / Т.В. Еремина, **А.Ф. Калинин**, А.Ф. Костюков, Г.А. Гончаренко // Вестник ВСГУТУ. – 2015. – №4. – С. 9-13.

9. **Калинин, А.Ф.** Лингвистическая модель интегрального риска техногенной опасности человеко-машинной системы [Текст] / **А.Ф. Калинин**, Т.В. Еремина // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – №8. – С. 83-87.

10. **Калинин, А.Ф.** К вопросу анализа интегральной оценки техногенного риска электротравматизма [Текст] / **А.Ф. Калинин** // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. – 2015. – №3. – С. 84-88.

11. **Калинин, А.Ф.** Интегральная оценка ущерба при нарушении техногенной безопасности электроустановок [Текст] / **А.Ф. Калинин**, Т.В. Еремина // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2015. – №7. – С. 14-16.

в других изданиях

12. Ерёмина, Т.В. Комплексное обеспечение электробезопасности ручных электрических машин [Текст] / Т.В., Еремина, **А.Ф. Калинин** // Научная дискуссия вопросы технических наук: материалы VIII международной заочной научно-практической конференции (04 апреля 2013г.). – Москва: Международный центр науки и образования 2013. – С. 134-139.

13. Ерёмина, Т.В. Критерии оценки электробезопасности ручных машин [Текст] / Т.В., Еремина, **А.Ф. Калинин**, А.П. Шматко // Научная дискуссия вопросы технических наук: материалы XVII международной заочной научно-практической конференции (декабрь 2013г.). – Москва: Международный центр науки и образования, 2013. – С. 103-107.

14. Eremina, T.V. Research of methods of an assessment of risk of traumatism in electroinstallations of agro-industrial complex / T.V. Eremina, **A.F. Kalinin** //

European Science and Technology: 6th International scientific conference. Munich 2013. Vol. II, Munich, (December 27th – 28th). 2013. – P.275–285. Ерёмина, Т.В. Исследование методов оценки риска травматизма в электроустановках агропромышленного комплекса [Текст] / Т.В. Еремина, **А.Ф. Калинин** // Европейская наука и техника: 6-я Международная научная конференция (27-го - 28-го декабря). – Мюнхен. Издание II, Мюнхен, 2013. – С.275-285.

15. Ерёмина, Т.В. Анализ риска электротравматизма при эксплуатации электроустановок [Текст] / Т.В. Еремина, **А.Ф. Калинин**, Д.С. Шурыгин // Вестник ВИЭСХ. – 2014. – №1(14). – С. 73-76.

16. **Калинин, А.Ф.** К вопросу анализа состояния техногенной безопасности на объектах экономики Российской Федерации [Текст] / **А.Ф. Калинин**, Т.В., Ерёмина, // Научная дискуссия: вопросы технических наук: материалы XXX международной заочной научно-практической конференции (январь 2015 г.). – Москва: Международный центр науки и образования, 2015. – С. 107-113.

17. **Калинин, А.Ф.** К проблеме вибрационной безопасности ручных электрических машин [Текст] / **А.Ф. Калинин**, Т.В., Ерёмина // Инновационные процессы в условиях глобализации мировой экономики: проблемы, тенденции, перспективы: сб. научных трудов / под ред. П. А. Неверова. – Прага: Vědecko vydavatelské centrum «Sociosféra-CZ». 2015. — С.345-348.

18. **Калинин, А.Ф.** Сценарная модель развития техногенных рисков в системе безопасности электроустановок [Текст] / **А.Ф. Калинин** // Электробезопасность. – 2015. – №2. – С.48-50.

19. Теория и практика управления техногенными рисками электроустановок [Текст]: учебное пособие для магистров по направлению "Электроэнергетика и электротехника" / О.К. Никольский, Т.В. Ерёмина, **А.Ф. Калинин** и др. – Барнаул: АлтГТУ, 2015. – 203 с.

Патенты

20. Пат. 134355 Российская Федерация, МПК H01H 83/00. Регулируемый выключатель дифференциального тока [Текст] / Т.В. Еремина, **А.Ф. Калинин**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления». – Заявл. 13.05.2013; Опубл. 10.11.2013, Бюл № 31. – 3с.

21. Пат. 150476 Российская Федерация, МПК B25D 11/04. Перфоратор ручной электрический ударного и ударно-вращательного действия [Текст] / Т.В. Еремина, **А.Ф. Калинин**, А.Л. Гармаев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» Заявл. 08.07.2014; Опубл. 20.02.2015, Бюл № 5. –3с.

Подписано в печать 14.09.2015г. Формат 60×84 1/16.
Усл.п.л. 1,39 Тираж 100 экз. Заказ № 206.

Издательство ВСГУТУ.
670013. г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40, в.

© ВСГУТУ, 2015