

На правах рукописи



ЧЕРКАСОВА НИНА ИЛЬНИЧНА

**ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫМИ РИСКАМИ
И ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Специальность 05.20.02 – "Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Барнаул – 2017

Работа выполнена в Рубцовском индустриальном институте (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова"

Научный консультант:

Никольский Олег Константинович,

заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор,

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова" (ФГБОУ ВО)

Официальные оппоненты: Буторин Владимир Андреевич,

доктор технических наук, профессор

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет (ФГБОУ ВО ЮУрГАУ)

Еремина Тамара Владимировна,

доктор технических наук, профессор

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления" (ФГБОУ ВО ВСГУТУ)

Сидоров Александр Иванович,

доктор технических наук, профессор

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГА-ОУ ВО ЮУрГУ (НИУ)

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВО АГАУ)

Защита диссертации состоится "15" декабря 2017 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46. Тел/факс (3852)36-71-29, официальный сайт: <http://www.altstu.ru>, электронный адрес: epb_401@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова" на официальном сайте. <http://www.altstu.ru/media/f/Dissertaciya-Cherkasova-N.I..pdf>

Автореферат разослан " " 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.

Лидия Васильевна Куликова

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Переход к новым хозяйственным механизмам, развитие всех технологических и производственных процессов невозможен без применения энергосберегающих технологий, роста энергоэффективности и снижения ущерба от аварийности и травматизма. В энергетической стратегии России на период до 2020 года одним из приоритетов является повышение энергоэффективности за счет снижения рисков, недопущение развития кризисных ситуаций и обеспечения потребителей электроэнергией нормативного качества.

По данным статистики, в России существует устойчивая тенденция роста техногенных аварий и электротравматизма на объектах энергетики. За последний год наибольшее количество несчастных случаев со смертельным исходом произошло на электроустановках потребителей (56 %), что обнаруживает рост техногенной напряженности на фоне низкой эффективности сельской энергетики.

Актуальность повышения эффективности функционирования систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей (СЭСП) в настоящее время возросла, что обусловлено следующими обстоятельствами:

- техническое состояние половины сельских сетей является неудовлетворительным, отключения воздушных линий 0,4 и 10 кВ составляют от 40 до 90 % от общего количества аварийных отключений, демонстрируя низкую надежность электроснабжения, вызывая огромные материальные потери сельхозпроизводителей и определенную социальную напряженность в сельскохозяйственных районах;

- более 35 % сельских потребителей имеют электроснабжение с нарушением качества поставляемой электроэнергии (ЭЭ) в плане несимметрии, несинусоидальности и отклонения напряжения. Ухудшение качества электроэнергии снижает уровень электромагнитной совместимости электрической сети энергосистемы и сети потребителей, ухудшает работу электроприемников, нарушает технологические процессы и наносит серьезный ущерб сельскохозяйственным предприятиям;

- потери электроэнергии при её передаче на уровне напряжения 0,4 кВ составляют 26 %, а на 10 кВ – 21 %, когда для технически развитых стран величина относительных потерь (даже в сельскохозяйственных сетевых компаниях) составляет не более 10%. Высокие потери влияют на рост стоимости электроэнергии (и себестоимость производимых товаров) и значительно снижают конкурентоспособность выпускаемой сельскохозяйственной продукции.

Сложившаяся неблагоприятная ситуация как в сельском хозяйстве, так и в целом по России представляет угрозу национальной безопасности страны, что вызвало необходимость включения в Перечень критических технологий РФ (утвержденных указом Президента с изменениями на 16 декабря 2015 г.) проблем техногенной безопасности и создания технологий энергосбережения и энергоэффективности.

Для решения проблемы эффективности, в том числе надёжности и безопасности, сельских электрических сетей необходима разработка новой методологии, в основе ко-

торой должна лежать концепция управления техногенными рисками на протяжении всего жизненного цикла электроустановки (ЭУ) с учётом случайных и неопределённых факторов, влияющих на возникновение аварий и других негативных последствий.

Работа выполнена в соответствии с Концепцией развития аграрной науки и научно-го обеспечения АПК России до 2025 года, Федеральным законом «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» (приказ от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ).

Степень разработанности темы исследования. Вопросам электроснабжения сельского хозяйства занимались известные учёные, основоположники этого направления: И.А. Будзко, М.С. Левин, Т.Б. Лещинская. Проблемам развития электрических систем и сетей посвятили труды: В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Мелентьев, В.И. Идельчик, В.М. Блок, В.З. Манусов, Лукутин Б.В. Вопросам надежности энергосистем и электроснабжения посвящены работы: Д.А. Арзамасцева, Ю.Н. Руденко, В.Г. Китушина, Б.И. Кудрина. Вопросам электробезопасности посвящены труды В.Е. Манойлова, О.К. Никольского, Т.В. Ереминой, А.И. Сидорова, А.А. Сошникова. Вопросами расчетов, анализа и снижения потерь электроэнергии в электрических сетях занимались В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев, В.Г. Пекелис, Г.Е. Поспелов, Д.Л. Файбисович. Вопросы качества электроэнергии рассмотрены в трудах И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, Г.Я Вагина, А.К. Шидловского и др.

Однако, при всей значимости выполненных исследований, некоторые аспекты данной проблемы изучены недостаточно. В частности, не рассматривалось влияние техногенных рисков объектов энергетики на эффективность функционирования систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей с точки зрения совокупности воздействия взаимовлияющих компонентов человеко-машинной системы.

Научная гипотеза состоит в предположении, что управление техногенной безопасностью электроустановок производственного объекта может быть достигнуто путём установления взаимосвязей компонентов сложной человеко-машинной системы (ЧМС) – "человек" (Ч), "система электроснабжения сельскохозяйственных потребителей (СЭСП)" (ЭУ) и "среда" (С).

Цель работы. Снижение техногенных рисков и повышение эффективности функционирования сельских электрических сетей за счет разработки методологии их оценки и прогнозирования на основе анализа динамической системы "Ч-СЭСП-С", функционирующей в условиях неполноты и неопределённости исходных данных.

Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи**:

1. Провести анализ современного состояния системы электроснабжения объектов сельскохозяйственного производства и инфраструктуры села, выявить факторы, способствующие повышению надёжности, безопасности, снижению электрических потерь и повышению качества электроэнергии потребителей.
2. Выбрать и обосновать структуру модели "Ч-СЭСП-С" для идентификации источников опасности ЧМС. Определить частные и обобщённые показатели эффективности функционирования систем электроснабжения объектов АПК.
3. Построить математическую модель оценки и прогнозирования аварий СЭСП на основе "деревьев" событий и последствий.

4. Разработать методологический аппарат для проведения анализа техногенной опасности при эксплуатации сельских электрических сетей.

5. Разработать методы и технические средства повышения эффективности СЭСП и предложения по совершенствованию методической и нормативно-технической базы в области обеспечения техногенной безопасности сельских электроустановок.

Научную новизну составляет следующее:

1. Методология обоснования и оценки критериев эффективности функционирования систем электроснабжения АПК, позволяющая на основе теории нечётких множеств получить количественные и качественные зависимости в системе "человек – электроустановка – среда";

2. Математическая модель, устанавливающая вероятности опасных техногенных событий элементов СЭСП с помощью диаграмм типа "дерево событий";

3. Методика управления техногенными рисками на основе разработанного алгоритма анализа и менеджмента интегрального риска систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей;

4. Методика оптимизации технических потерь при реконструкции сетей 10-0,4 кВ, на основе экономической плотности тока, рассчитанной с учетом современных условий;

5. Обобщенный показатель эффективности функционирования систем электроснабжения, включающий факторы надёжности, безопасности, экономичности и качества электроэнергии.

Теоретическая и практическая значимость работы

Выявленные закономерности и зависимости, разработанные технические решения и результаты оценки эффективности функционирования распределительных сетей явились базой для совершенствования методов и технических средств для принятия технических решений при проектировании, реконструкции и эксплуатации систем электроснабжения АПК с учетом менеджмента техногенного риска.

Разработанные "Методические рекомендации по оценке техногенных рисков в электроустановках на объектах АПК", согласованные с Министерством сельского хозяйства Алтайского края, рекомендованы для практического применения.

Разработаны предложения по изменению пунктов "Правил устройства электроустановок" 7-го издания, переданы и одобрены Департаментом административной и законопроектной работы Министерства энергетики Российской Федерации.

Разработанный информационно-программный комплекс используется компанией ПАО "МРСК Сибири" – "Алтайэнерго" для выполнения необходимых расчетов, связанных с эксплуатацией и ремонтом сетей 10 кВ.

Методология и методы исследования

Общая методологическая основа исследования заключалась в применении системного подхода, статистического и факторного анализов, теории рисков, экспертных систем, имитационного моделирования, теории нечетких множеств.

Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием программных комплексов STATISTIKA 6.0, компьютерной программы Microsoft Office Excel и разработанными программами "Автоматизированный расчет критериев эффективности электрических сетей", "Автоматизированный расчет надёжности и экономичности воздушных линий электропередач".

Положения, выносимые на защиту:

1. Методология оценки и управления критериями эффективности функционирования систем электроснабжения АПК, основанная на функционально - морфологическом анализе системы "Ч – СЭСП – С".
2. Уточнение расчета экономической плотности тока с учетом степени инфляции, задаваемого срока окупаемости, особенностей источников инвестирования и современных (действующих) тарифов на электроэнергию.
3. Методология оценки эффективности функционирования сетей 10 кВ по многокритериальной модели на основе методов теории нечётких множеств, реализованной в экспертной среде.
4. Применение функции желательности (принадлежности) для оценки эффективности функционирования распределительных сетей в многоуровневой системе неравноценных частных критериев.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность положений работы подтверждается сходимостью теоретических результатов, численного моделирования и экспертных оценок.

Основные результаты работы были использованы на объектах энергетики: в распределительных компаниях "ПАО МРСК Сибири" - «Алтайэнерго»; сетевой компании "Алтайкрайэнерго" и в системах электроснабжения АПК Алтайского края, о чем свидетельствуют акты о внедрении.

Результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе в ФГБОУ ВО "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова" и его филиале Рубцовский индустриальный институт при изучении дисциплин "Электроэнергетические системы и сети", "Системы электроснабжения", "Безопасность жизнедеятельности".

Основные результаты работы обсуждались на Международных, всероссийских и региональных вузовских научно-практических конференциях, в том числе: на Международных научно-практических конференциях: «Электроэнергетика в сельском хозяйстве (Барнаул, 2011 г.), «Экология и ресурсо - и энергосберегающие технологии на предприятиях народного хозяйства» (Пенза, 2011 г.), «Технические науки: современные проблемы и перспективы развития» (Йошкар-Ола, 2012 г.), «Научные и технические средства обеспечения энергосбережения и энергоэффективности в экономике» и «Экономика, экология России в 21-м столетии» (Санкт-Петербург 2012, 2013 гг.), "Science, Technology and Higher Education" (Westwood, Canada, 2013), "European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches", (Stuttgart, Germany, 2013); «Актуальные проблемы транспорта и энергетики», (г. Астана, Казахстан, 2013 г.), «Инновации в науке» (г. Новосибирск, 2013 г.) «Теоретические и практические

аспекты современной науки» (Москва, 2013 г.), «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (Орел, 2013, 2014, 2016 гг.) и на Международных конференциях «Развитие науки в XXI веке», Украина, г. Донецк, 2014 г.; «Наука как движущая антикризисная сила» (Украина, г. Киев, 2014 г.).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Научные результаты диссертации соответствуют специальности: 05.20.02 "Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве", в области исследования: "Обоснование, исследование и разработка средств и методов повышения надежности и экономичности работы электрооборудования в сельскохозяйственном производстве. Обоснование способов, методов и технических средств эксплуатации энергетических систем и установок в сельскохозяйственном производстве. Разработка методологических основ создания надежного и экономичного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей".

Публикации. По материалам диссертационных исследований опубликовано 46 печатных работ, в том числе 30 научных статей в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, три монографии и два учебных пособия.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 разделов (глав), заключения, библиографического списка, включающего 295 наименований, и приложений. Общий объём работы составляет 370 страниц, включая 46 таблиц и 69 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, вопросы апробации и реализации полученных научных результатов.

Глава 1 посвящена анализу состояния вопроса и обоснованию задач исследования. Прослежен генезис задачи по выбору оптимального варианта развития сети для обеспечения требуемого уровня надежности, которая на протяжении многих лет решалась на основе одного критерия – минимума приведенных затрат (Глазунов, В.И. Идельчик, В.М. Блок) и детерминированных методов. Однако детерминированная информация, основанная на закономерных причинно-следственных связях и численно однозначно заданных параметрах, не может отображать динамично изменяющиеся параметры системы электроснабжения. Дальнейшее развитие теории электроснабжения происходит в работах М.С. Левина (вероятностные методы анализа) и Т.Б. Лещинской (многокритериальная оптимизация). Однако, при всей обширности выполненных исследований, *влияния техногенных рисков на эффективность функционирования систем электроснабжения сельских районов в подобных работах не рассматривались.*

Сложившаяся обстановка в области безопасности вызывает серьезную тревогу. Растет число аварий в электроустановках потребителей, а их масштаб и тяжесть уве-

личиваются. В 2016 году в поднадзорных Ростехнадзору организациях произошло 64 несчастных случая со смертельным исходом (рост 20 %), из которых на установках потребителей – 36.

В период с 1950 по 70-е годы прошлого столетия государственный надзор за эксплуатацией электрооборудования, контроль за обязательным внедрением мероприятий по охране труда, советское законодательство, предусматривающее уголовное наказание лицам, не обеспечившим предусмотренных защитных мероприятий, являлись действенными средствами борьбы с травматизмом, и год от года по отраслям экономики показатели травматизма уменьшались (табл. 1).

Таблица 1 – Распределение (в процентах) производственных электротравм по отраслям народного хозяйства СССР

Отрасль	Годы		
	1951-1952	1964-1966	1970-1972
Машиностроение	6,1	4,1	5,9
Металлургия	8,0	4,0	3,2
Строительство	10,9	11,7	13,2
Угольная промышленность	17,2	2,8	1,8
Сельское хозяйство	6,6	27,7	28,5
Коммунально-бытовые предприятия	3,8	4,3	5,8
Прочие отрасли	47,4	45,5	41,6
ИТОГО:	100,0	100,0	100,0

Анализ таблицы 1 показывает, что в сельском хозяйстве электротравматизм не только превышал соответствующий показатель по Союзу в целом, но и увеличивался год от года (за 20 лет в 4,3 раза). Практически четверть всех производственных электротравм происходит в сельском хозяйстве, хотя его энергоустановки потребляют лишь 5- 6 % производимой в стране электрической энергии.

В новых экономических условиях реализации рыночных отношений, на фоне угрожающей изношенности основных фондов энергетики, электротравматизм по-прежнему представляет серьёзную опасность. В некоторых отраслях он снижается, а в строительстве, сельском хозяйстве, быту возрастает (таблица 2). По числу несчастных случаев сельское хозяйство уступает только двум отраслям экономики: строительству и предприятиям энергетики.

По данным компании ПАО "Россети", средняя степень износа электросетевых объектов, включая здания и сооружения, составляет свыше 70%, в эксплуатации свыше 30 лет находится более 55 % подстанций и 60 % комплектов релейной защиты. Технический уровень подстанционного оборудования в сетях соответствует оборудованию, которое эксплуатировалось в технически развитых странах 40 лет назад. Особенно остро техническое отставание ощущается в системах сельского электро-снабжения.

Таблица 2 – Динамика электротравматизма по отраслям экономики

Отрасль экономики	Число несчастных случаев по годам					
	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Предприятия энергетики	109	183	420	342	241	260
Машиностроение и металлообработка	18	36	36	23	63	55
Жилищно-коммунальное хозяйство	37	53	47	62	62	59
Строительство	24	43	39	59	71	87
Сельское хозяйство	40	54	54	40	56	67
Топливная и угольная промышленность	16	12	25	20	20	37
Транспорт и связь	-	-	41	40	42	39

В сетях 10 кВ происходит, в среднем, до 30 отключений в год в расчете на 100 км воздушных линий (таблица 3) с перерывом электроснабжения до 40 часов в год. В технически развитых странах соответствующие показатели составляют 7-8 отключений с длительностью не более 7-10 час. на 100 км в год.

Таблица 3 – Мониторинг перерывов электроснабжения в сетях 10 кВ в течении 2014 года (на 100 км)

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Авг	Сен.	Окт	Нояб	Дек	За год
Число отключений	2,21	1,93	2,64	3,78	4,71	7,41	4,14	3,07	1,24	1,50	3,50	1,07	34,57
Время отключений, час	1,35	0,50	4,19	3,7	5,56	6,34	4,28	2,93	0,68	1,81	6,60	2,09	40,03

Для крупных сельскохозяйственных предприятий всякое отключение – плановое, а особенно внезапное, аварийное наносит огромный ущерб потребителям и самой энергетической системе. При проектировании распределительных сетей учитывается технический показатель надежности ω – средняя частота устойчивых отказов, который для ВЛ 10 кВ составляет 7,6 устойчивых отказов на 100 км в год. В действительности этот показатель больше в три-четыре раза.

Все методы определения надёжности даются как методы анализа. Методы на основе синтеза в методическом плане практически не разработаны. Недостаточно проработаны критериальные вопросы, особенно методы учета риска, и совершенно недостаточно при расчетах надёжности применяется методология неопределённости.

Ухудшение качества ЭЭ приводит к отрицательным последствиям электротехнического и технологического характера. Результаты измерений качества электроэнергии (КЭЭ) в сетях 10-0,4 кВ в рамках сертификации электроэнергии показали тревожно низкий уровень трех основных показателей качества (таблица 4).

Таблица 4 – Характеристика сельских электрических сетей по качеству электроэнергии

	Количество ВЛ с ухудшенными показателями качества электроэнергии, %				
	Отклонение напряжения	Несинусоидальность		Несимметрия напряе-	
	$\Delta U, \%$	K_{Un}	K_U	K_{2U}	K_{0U}
ВЛ -10 кВ	41	19	13	46	-
ВЛ 0,4 кВ	48	27	38	54	45

Более 40 % сельских электрических сетей имеют отклонение напряжения выше предписанных значений (ΔU , %). Превышение показателей несинусоидальности (K_U , K_{Un} – коэффициенты суммарной и n -ой гармонической составляющей напряжения) наблюдается в 38 % линий, показателей несимметрии ($K_{2U}K_{0U}$) – почти в половине. Известно влияние каждого показателя на электрооборудование. Отклонение от норматива приводит к увеличению нагрева, снижению срока службы, дополнительным потерям электроэнергии, мощности и напряжения; нарушению технологических процессов, поломке оборудования, отказу релейной защиты, авариям. Несмотря на то, что стандарты на нормы качества поменялись трижды (ГОСТ 13109-97, ГОСТ Р 54149-10, ГОСТ 32144-2013), качество напряжения у основной массы сельских потребителей не улучшилось и по существу не оценивается. Расчётные отклонения напряжения практически всегда отличаются от стандартных положительных или отрицательных медленных изменений напряжения в точке передачи ЭЭ, а действительные параметры качества электроэнергии являются неопределёнными значениями.

Экономичность. Основными критериями экономичности распределительных сетей считаются уровень потерь ЭЭ и пропускная способность сети. В сельских распределительных сетях 35-0,4 кВ теряется более половины (55 %) от всей потерянной в энергосистеме электроэнергии (таблица 5). Основными способами повышения экономичности работы сети является снижение технических потерь до экономически обоснованных пределов, а также снижение коммерческих потерь.

Таблица 5– Потери электроэнергии в сетях различных уровней напряжения

$U_{ном}$, кВ	ВН 500	ВН 220	ВН 110	СН 35	СН 6-10	НН 0,4
Потери электроэнергии	18 %	6 %	21 %	8 %	21 %	26 %

Известно, что при расчете потерь в линии главной составляющей (при одинаковой нагрузке) является сопротивление провода, зависящее от его сечения (F , мм²), которое выбирается по экономической плотности тока. Согласно ПУЭ для неизолированных алюминиевых проводов значения экономической плотности тока принимались в пределах 1,0...1,3 А/мм² – в зависимости от числа часов использования максимальной нагрузки. В настоящее время значительно изменилась стоимость электроэнергии (увеличилась в 6...9) раз. Однако глава ПУЭ 1.3 "Выбор сечения проводников по экономической плотности тока) не изменилась. Сегодня настала необходимость адаптации обобщенного показателя экономически оптимальной загрузки линии к новым экономическим условиям.

В основе решения практических задач, направленных на предупреждение (снижение) техногенных опасностей и их последствий в ЭУ, должна лежать методология оценки и управления рисками, включающая учет необходимых затрат и предотвращённого ущерба. В настоящее время сформулирована единая научно обоснованная методология, обеспечивающая закономерности возникновения и развития техногенных опасностей, сущность которой базируется на энергоэнтروпийной концепции.

Несмотря на значительное число исследований, посвященных методам оценки риска на особо опасных объектах (химическое производство, атомная и гидроэнергетика, нефтегазовый комплекс и др.), в настоящее время отсутствуют методические основы разработки математических моделей рисков систем электроснабжения

сельскохозяйственных потребителей (в том числе электроустановок), не обоснованы также соответствующие критерии и показатели при рассмотрении объекта исследования как человеко-машинной системы.

Проведенные исследования обнаружили, что при анализе причин сложившейся негативной техногенной обстановки в России главной принято считать критический износ основных фондов объектов энергетики, что, в принципе, не вызывает сомнений. Однако еще одной важной причиной, по нашему мнению, можно считать *отсутствие научно-методического обеспечения опасных производственных объектов систем электроснабжения, в том числе сельскохозяйственных производителей.*

Необходимо обоснование *обобщенного* критерия эффективности в условиях неопределённости с учётом взаимосвязи компонентов сложной человеко-машинной системы.

Неопределённость состоит в неточности экспериментальных результатов, невозможности получения идентичной статистики из-за динамических свойств системы ЧМС, ненадёжности знаний – отсутствия алгоритмов получения точных данных, в связи с вероятностной природой исходных данных.

Вторая глава посвящена разработке методологии выбора и оценки критериев эффективности СЭСП, построенной на функционально-морфологическом анализе модели "Человек – Система электроснабжения сельских потребителей – Среда" (Ч- СЭСП –С).

Система электроснабжения сельских потребителей из-за сложности её структуры и многофункциональности, стохастического функционирования и неопределённости относится к классу динамических, сложных человеко-машинных систем (ЧМС). Такой подход позволяет применить методы анализа и синтеза сложных эргодических открытых и слабоструктурированных систем, учитывающих ошибки персонала, населения (компонент "человек"); потенциальную опасность электрической энергии, которая из-за нарушения устойчивости внутренних связей и в результате неуправляемого выброса энергии (энергоэнтропийная концепция) может привести к отказам и авариям (компонент "СЭСП"); неблагоприятные факторы внешней среды (компонент "среда"), например метеорологические условия, сверхнормативные нагрузки и т. д.

Функционирование любой сложной системы нацелено на достижение множества целей, и логически следует необходимость её многокритериальной оценки. Система критериев должна быть полной, действенной, разложимой, избыточной и минимальной. Эффективность функционирования – это мера качества собственно функционирования объекта или целесообразности его использования для выполнения заданных функций. Иными словами, эффективность – это степень приспособленности системы к выполнению соответствующих функций в определенных условиях. В условиях социалистического народного хозяйства показателем эффективности электрической системы принимали математическое ожидание отпускаемой электроэнергии:

$$\Phi(t) = \mathcal{E}(t) / [\mathcal{E}(t) + \Delta \mathcal{E}(t)],$$
 где $\mathcal{E}(t)$ – математическое ожидание электроэнергии требуемого качества, полученной потребителями системы в период времени $(0,$

t); $\Delta \mathcal{E}(t)$ – математическое ожидание недоотпущенной электроэнергии и электроэнергии с показателями качества ниже установленных норм. В существующих ныне условиях рыночной экономики применимы два подхода к формированию критериев эффективности СЭСП. Один заключается в оценке степени достижения цели с позиции надсистемы, а другой определяется внутренними свойствами самой системы. В качестве надсистемы выступает единая энергосистема России, представленная компанией ПАО "Россети", а с другой – сельскохозяйственные потребители. С позиции последнего критериями эффективности СЭСП выступают *уровень надежности электроснабжения, качество поставляемой электроэнергии и электробезопасность системы*. С позиции ПАО "Россети" критерием эффективности является *прибыль компании, которая увеличивается с уменьшением затрат на эксплуатацию системы*, назовем данный критерий **экономичностью** (Э). Выбирая критерии, будем опираться на понятия результативности и полезности. Результативность системы отождествляется с её эффективностью и определяется отношением эффекта к затраченному ресурсу. Полезность системы электроснабжения определяется главным её свойством – электроснабжением потребителей. Чем ниже **надёжность** (Н) электроснабжения, тем менее полезной оказывается система, и потребители вынуждены ориентироваться на другие источники электрической энергии. Аналогичные рассуждения отнесём и к **качеству электроэнергии** (К). Проблема качества, особенно отклонение напряжения и его влияние на работу сельских потребителей, являлась предметом многих исследований. Здесь также применим вывод, что снижение качества ниже определённого уровня утрачивает преимущества снабжения электроэнергией от данной системы по сравнению с другими источниками. Обеспечение **безопасности** (Б), сохранение здоровья и жизни потребителей при использовании электроэнергии, безусловно, является также наиважнейшим критерием эффективности СЭСП.

Таким образом, эффективность системы можно представить количественным показателем Φ , отражающим ее свойства, направленные на выполнение заданных функций. Выражение обобщённого показателя эффективности можно представить: $\Phi(t) = \Phi_H(t) + \Phi_B(t) + \Phi_{\mathcal{E}}(t) + \Phi_K(t)$, где $\Phi_H(t)$, $\Phi_B(t)$, $\Phi_{\mathcal{E}}(t)$, $\Phi_K(t)$, – показатели надежности, безопасности, экономичности, качества электроэнергии в период времени $(0, t)$.

Для идентификации источников опасности и критериев эффективности обратимся к человеку-машинной системе "Человек-Системы электроснабжения сельских потребителей (СЭ).-Среда".

В диссертационной работе предложено функционирование системы "Ч – СЭСП – С" представить в виде двухпараметрической модели, объединяющей в себе два понятия: эффективность, Φ и риск, R , (риск – сочетание вероятности и последствий наступления неблагоприятных событий (ущербов)). При возникновении риска (риска ухудшения надёжности, экономичности, снижения качества электроэнергии или безопасности) имеет место снижение эффективности.

Показано, что соотношение между объёмами двух понятий Φ и R можно определить как "равнозначность". С точки зрения формальной логики понятие "функционирование системы" является суперординатным понятием, включающим два субор-

динатных понятия, Φ и R , которые находятся на одном уровне и называются координатными. Когда координатные понятия получены на основе одного признака деления вышестоящего понятия, то они составляют его *аспект*. Таким образом, понятия "эффективность" и "риск" представляют два аспекта функционирования человеко-машинной системы. Между понятиями существуют разнообразные отношения и различные связи, выявление которых в пределах модели "Ч – СЭСП – С" позволит точнее их идентифицировать и определить общие и отличительные признаки путём сравнения и различения.

Снижение эффективности появляется в результате возникновения риска от недоотпуска электроэнергии, от ухудшения режима напряжения, от аварийного отключения ЭУ, электротравматизма и т.д., которые будем считать рискообразующими факторами (РОФ – негативное проявление взаимосвязей человеко-машинной системы (СЭСП), приводящее к возникновению предпосылок и инцидентов). Негативным последствием снижения эффективности и появления рисков являются ущербы. Это позволяет нам утверждать следующее: ущербы являются общим признаком двух аспектов функционирования системы. Снижается эффективность – появляется риск, следствием которого – ущерб.

Количественно два аспекта функционирования системы постоянно изменяются в зависимости от изменения параметров эффективности и появления рискообразующих факторов. Если для повышения безопасности были затрачены средства, повысилась надёжность системы, и если снизился уровень риска, то, несмотря на снижение экономичности, правомерно говорить о повышении обобщенной эффективности системы.

Под *обобщенной эффективностью систем электроснабжения производственного объекта* будем понимать её свойство выполнять заданные функции, обеспечивая при этом надёжность (бесперебойное снабжение электроэнергией потребителей), безопасность (противостояние электротравматизму, пожарам и опасным электромагнитным излучениям), экономичность (передачу и распределение электроэнергии с наименьшими затратами) и качество электроэнергии в нормируемых пределах, при которых с заданной, высокой вероятностью исключаются происшествия, а возможный ущерб от них считается оптимизационной задачей.

Последствия нежелательных и опасных происшествий в электроустановках составляют последовательность ряда негативных событий: перерывы электроснабжения, снижение прибыли компании, затраты на ликвидацию аварий, людские потери, ухудшение экологической обстановки, выбытие основных производственных фондов и мощностей, представления компенсационных социальных льгот и т. д.

В диссертации показано, что опасность техногенных явлений в электроустановках обуславливается внутренними и внешними факторами, а также неблагоприятным их сочетанием. Внешние факторы вызваны взаимодействием СЭСП со средой: техногенной, социальной и экономической. Внутренние факторы связаны с физическими процессами, протекающими в СЭСП: старение, износ и деградация, приводящие к отказам и авариям. Сюда же следует отнести деятельность человека (согласно статистике большая часть аварий происходит по причине неадекватности персонала к сцена-

риям развития аварий). С повышением уровня техногенной составляющей возрастает роль человеческого фактора. Риск каждого индивидуума зависит от имманентных его характеристик, среди которых можно выделить психосоматическую, когнитивную и мотивационную составляющие. Необходимо учитывать надежность действий человека, основываясь на системном анализе, на знании закономерностей его реакций и причин, их вызывающих.

Определено, что функционирование системы "Ч – СЭСП – С" происходит во взаимосвязи всех компонентов системы и зависит от работы электроустановки, действий человека и воздействий внешней и внутренней среды. Человеческий фактор может рассматриваться с точки зрения образования, профессиональных навыков, дисциплинированности, особенностей психологии. К факторам среды относятся внутренние и внешние факторы: условия труда, заработная плата, мотивация, уровень развития экономики, и нормативно -технической базы, экология и т. д.

Риск рассматривается как мера опасности и характеризуется вероятностью возникновения негативного события и тяжестью его последствия.

В работе определено, что техногенные риски при нормальной эксплуатации электроустановок могут проявляться ухудшением эффективности: снижением надёжности системы (отказы, аварии, перерывы электроснабжения, недоотпуск электроэнергии), снижением экономичности (увеличение потерь, снижение пропускной способности, неоптимальные режимные и схемные решения), ухудшением показателей качества электроэнергии (отклонение напряжения, несимметрия напряжения, высшие гармоники), а также снижением безопасности (возникновение опасной техногенной ситуации в виде вредодействующего или опасного контролируемого высвобождения электрической, тепловой и/или электромагнитной энергии, из-за ошибки человека, отказа электроустановки или воздействия среды), рисунок 1.

В диссертации рассмотрена концепция техногенного риска электроустановки, сочетающая как вероятностное представление об опасности, так и возможность качественно-количественной оценки негативной ситуации и её последствий.

Для оценки и управления риском существенным является изучение связей его с ущербом. Очевидно, что для снижения риска нужны определённые затраты, которые не должны быть неограниченными. Поэтому должен существовать некий оптимум величины риска, определяемый по критерию "затраты – выгоды".

Под интегральным риском электроустановки (ИРЭ) будем понимать показатель потенциальной техногенной опасности, учитывающий социальный, материальный и экологический ущерб, выраженный в едином денежном эквиваленте, математическая модель ИРЭ может быть представлена как

$$R = R(Y_C) + R(Y_M) + R(Y_Э),$$

где $R(Y_C)$, $R(Y_M)$, $R(Y_Э)$ – риски социального, материального и экологического ущерба (Y_C , Y_M , $Y_Э$). Будем рассматривать ИРЭ, R , учитывающий все виды неприятных событий, как результат взаимодействия системы "Ч– СЭСП– С". Действие каждой из трех компонентов являются источниками причин возникновения опасных или негативных техногенных ситуаций (ОТС) и их исходов, т.е. отказов и аварий электроуста-

новок, режимных отклонений, ошибок и неправильных действий человека и негативных воздействий среды.

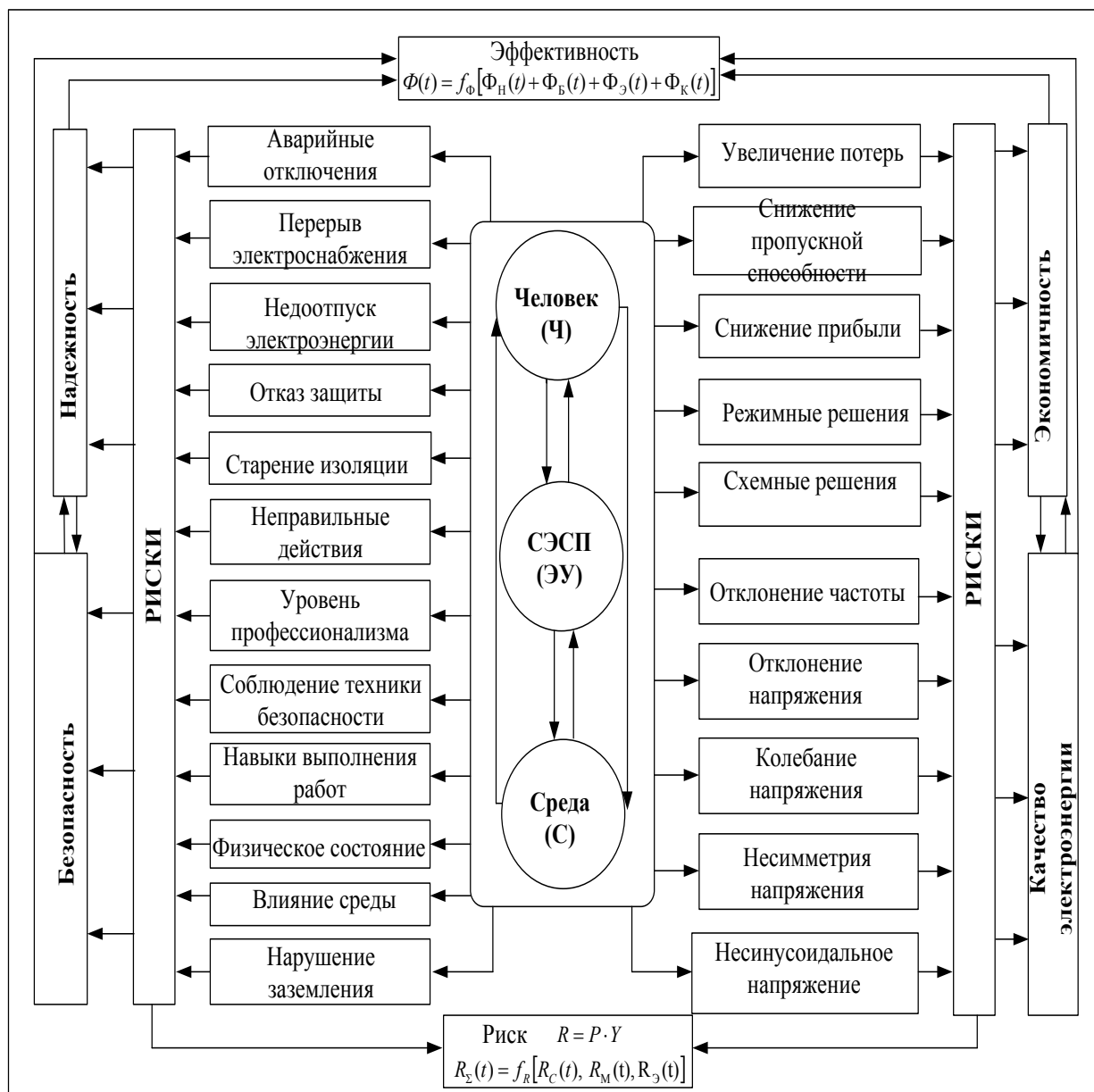


Рисунок 1 – Структурная схема функционирования системы "Ч – СЭ – С"

Исходными данными для построения математической модели, и в рамках ее исследования, автором была разработана классификация видов риска ЭУ (таксономия опасностей) по: объектам воздействия, видам ущерба, масштабу опасности, частоте возникновения, времени проявления, характеру воздействия, продолжительности действия, степени влияния, сложности структуры, форме представления (рисунок 2).

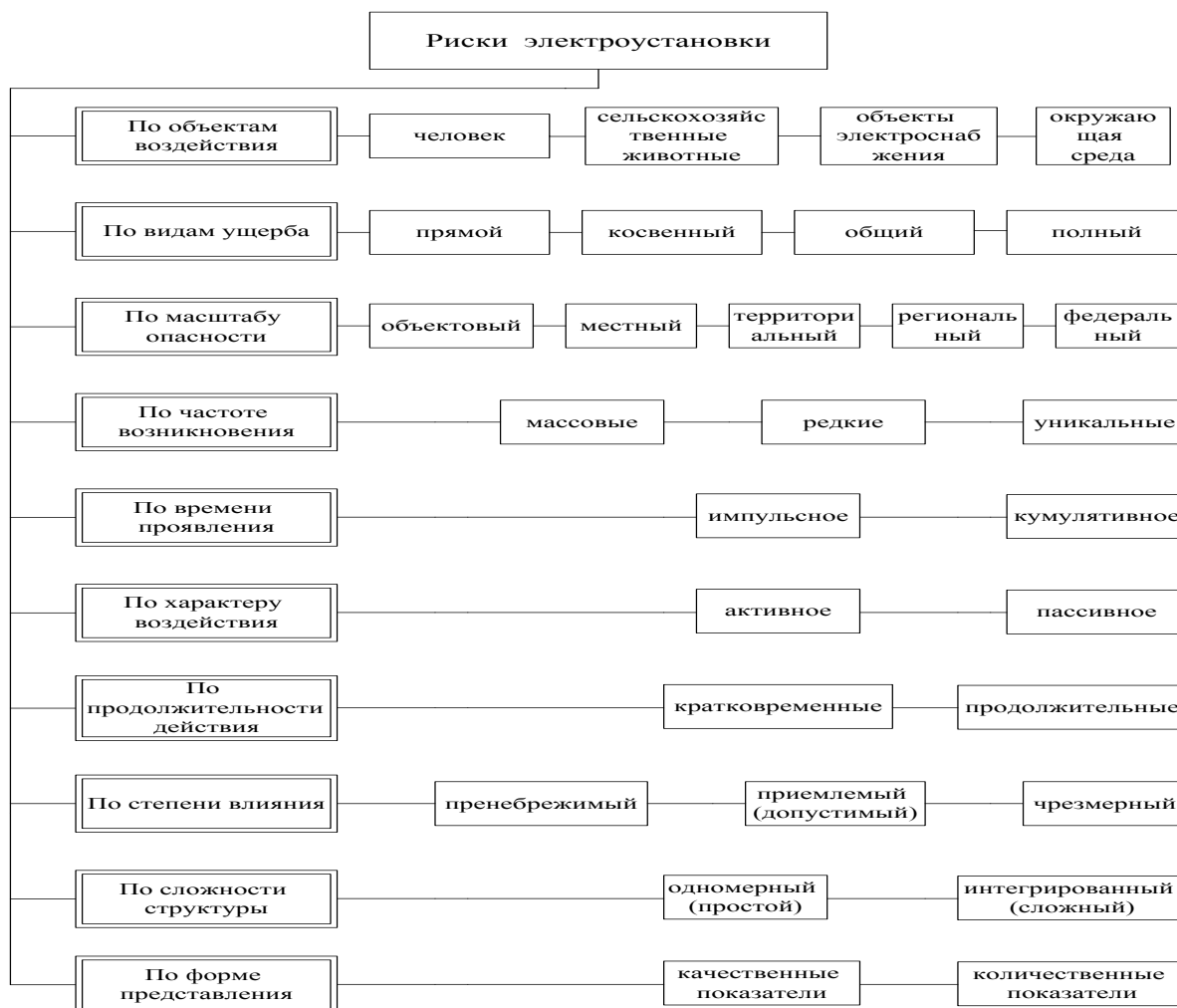


Рисунок 2 – Таксономия рисков

Под ущербом электроустановки в общем случае будем понимать результат изменения состояния энергообъекта, выражающегося в нарушении целостности или ухудшении функциональных его характеристик, приводящих к социальным и экономическим потерям. Введение единой шкалы ущерба дает возможность оценивать опасность события двумя факторами: его частотой и объемом материальных потерь.

Третья глава посвящена моделированию и анализу риска и построению алгоритма управления рисками электроустановок. Модель системы в общем виде включает в себя три компонента: "человек" (электротехнический персонал, население), "электроустановка" (система электроснабжения сельских потребителей, включая все её элементы), "среда" (область рабочего пространства, а также внешняя среда, всё то, что может опосредованно влиять на процесс формирования опасной техногенной ситуации) (рисунок 3).

Приняты векторные обозначения: $X(t)$ - входные воздействия на систему (интерпретируются как заданные цели и функции в определённых интервалах времени); $Y(t)$ - выходное воздействие системы на внешнюю среду (проявляется результатом функционирования системы ЧМС); возмущающие воздействия $Z(t)$ - негативные (рискообразующие) факторы внешней среды (сверхнормативные нагрузки, параметры микро-

климата, социально-экономические условия); $S(t)$ - состояние системы в определённый интервал времени (безопасное, опасное, критическое и т.д.).

Представим модель в виде обобщённого выражения:

$$M = \{X, Y, Z, S, T, q, h\},$$

где $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$;

$Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$;

$Z = (z_1, z_2, \dots, z_p)$; – пространство входных, выходных и возмущающих воздействий;

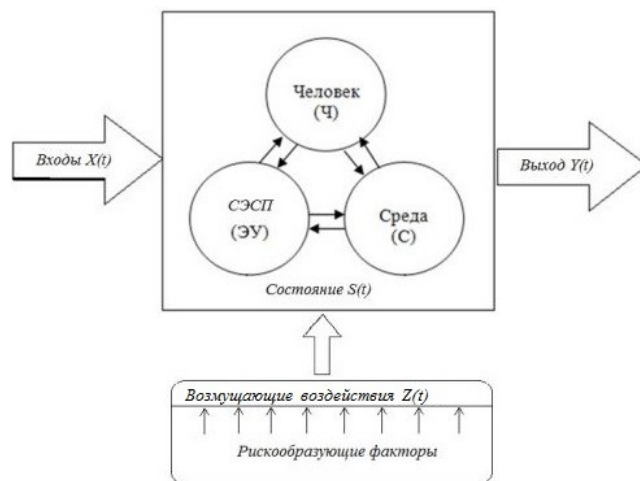


Рисунок 3 – Модель системы Ч-СЭСП-С

q - оператор переходов, отражающий изменение состояния системы, под воздействием рискообразующих факторов;

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

Выделим наиболее характерные состояния системы с разным уровнем возмущающего воздействия: *низким* – не превышающим пороговых значений энергии (система находится в состоянии гомеостазиса) – *незначимая величина риска (Н)*;

допустимым – возмущение проявляется в виде незначительных колебаний, не выходящих из состояния равновесия – *малая величина риска (М)*;

опасным – приводящим систему к кризисному режиму функционирования при сохранении системных свойств при незначительных ущербах – *средняя величина риска (С)*;

критическим – приводящим к состоянию катастрофы при значительном изменении интегральных показателей из-за радикальной перестройки структуры и морфологии. Катастрофическое состояние системы вызывает значительные аварии, человеческие жертвы и ухудшение экологической обстановки (пожары) – *высокая величина риска (В)*;

чрезвычайным – приводящим к полному разрушению системы и прекращению её существования – *катастрофическая величина риска (К)*.

Для иллюстрации метода моделирования рисков (применяя один из логико-графических методов анализа - "дерево отказов") рассмотрим возникновение аварии КТП. Анализ «дерева отказов» («Fault Tree Analysis» - FTA) - это дедуктивный метод определения условий и факторов, способных привести к определенному нежелательному (головному) событию. «Дерево отказов» - логически организованная графическая конструкция, в которой демонстрируется взаимодействие элементов системы, отказ которых по отдельности или в сочетании может способствовать отказу системы в целом. В качестве головного события рассмотрим аварию системы электроснабжения, с перерывом подачи электроэнергии и вынужденным простоем технологического оборудования потребителей. Головное событие может быть вызвано тремя видами отказов: иницирующими - неправильными действиями персонала (человеческий

фактор); первичными - естественные процессы износа и старения (изоляция, например), в результате чего возникает короткое замыкание и выход из строя ЭУ; вторичными, возникающими при нарушении проектных и нормативных требований, технических условий и т.д. Отметим, что это деление весьма условно (так как человек, строго говоря, является первопричиной всех техногенных происшествий). Часто случается, что процессы старения и износа элементов ЭУ не были своевременно обнаружены в результате плохой диагностики, некачественного ремонта (нарушения требований ПУЭ, ПТЭ-ЭП); в результате чего элементы ЭУ не выдержали негативного воздействия факторов внешней среды (дождь, гроза, порывы ветра, низкие температуры).

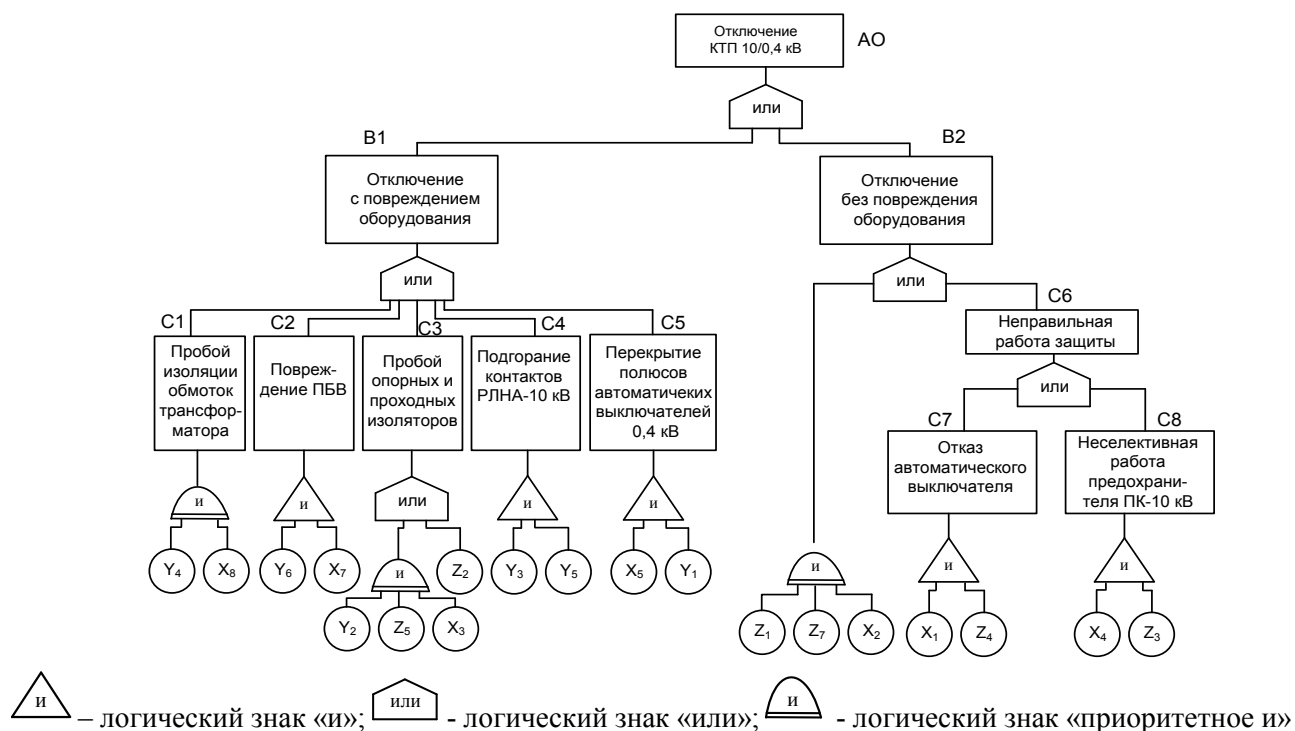


Рисунок 4 – Дерево риска аварии КТП 10/0,4 кВ

Рассмотрим аварию на КТП 10/0,4 кВ, как наиболее часто повреждаемого элемента СЭСП. Пример дерева риска (ДР) аварий приведен на рисунке 4. Структура «дерева» включает одно головное событие (аварию, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи (сценарии аварий). Для связи между событиями в узлах «деревьев» используются логические знаки «И» (означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий (соответствует перемножению их вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события)) и «ИЛИ» (означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий), знак "приоритетное И" означает, что выходное событие наступает, если предыдущие события происходят в нужном порядке слева направо. Сформируем базу данных (таблица 6), состоящую из множества компонентов ЧМС (конкретные исходные события "дерева отказа" аварии

КТП 10/0,4кВ), сгруппированные в три множества: X (человеческий фактор), Y (электроустановка), Z (рабочая среда).

Таблица 6 – Предпосылки аварийного отключения КТП 10/0,4 кВ (исходные события "дерева аварий" согласно рисунку 6)

№ п/п	Событие или состояние модели	Вероятность события P_i
Ч	X_1 Низкий уровень квалификации персонала	0,01
	X_2 Несвоевременные осмотры оборудования (несоблюдение ПТЭЭП)	0,002
	X_3 Несвоевременное техническое обслуживание оборудования (несоблюдение ПТЭЭП)	0,003
	X_4 Замена предохранителей проводником (отступление от норм)	0,004
	X_5 Неправильные действия (бездействие)	0,03
	X_6 Ошибки при монтаже шлейфов 10 и 0,4 кВ	0,001
	X_7 Навыки выполнения работ	0,002
	X_8 Нарушение сроков испытаний и измерений оборудования	0,001
ЭУ	Y_1 Срок эксплуатации КТП 10/0,4 кВ	0,05
	Y_2 Старение изоляции опорных и проходных изоляторов	0,05
	Y_3 Аварийные режимы нагрузки	0,004
	Y_4 Потеря изоляционных свойств трансформаторного масла	0,004
	Y_5 Износ токоведущих частей	0,001
	Y_6 Повреждение контактора ПБВ	0,005
С	Z_1 Конструктивные недостатки КТП (отсутствие герметичности)	0,05
	Z_2 Некачественные испытания изоляции	0,001
	Z_3 Условия труда (отсутствие калиброванных предохранителей)	0,004
	Z_4 Ошибка в расчете параметров защитного оборудования	0,002
	Z_5 Воздействие окружающей среды (попадание дождя и снега под кожух КТП)	0,005
	Z_6 Порывы ветра (воздействие окружающей среды)	0,01
	Z_7 Посторонние предметы в шкафах ВН и НН (оплошность персонала)	0,001

ПБВ* – переключатель без возбуждения

Анализ ДР позволяет выделить ветви прохождения сигнала к головному событию и указать минимальные пропускные сочетания и минимальные отсечные сочетания.

Минимальные пропускные сочетания – набор исходных событий-предпосылок (на рисунке 6 отмечены символами X_i Y_i Z_i), обязательное (одновременное) возникновение которых достаточно для появления головного события – аварии: $\{Y_4 \cdot X_8\}$, $\{Y_6 \cdot X_7\}$, $\{Y_2 \cdot Z_5 \cdot X_3\}$, $\{Z_2\}$, $\{Y_3 \cdot Y_3\}$, $\{X_5 \cdot Y_1\}$, $\{Z_1 \cdot Z_7 \cdot X_2\}$, $\{X_1 \cdot Z_4\}$, $\{X_4 \cdot Z_3\}$. Используются для выявления "слабых" мест. Минимальные отсечные сочетания – набор исходных событий, который гарантирует отсутствие головного события при условии не возникновения ни одного из составляющих этот набор событий: $\{Y_4 \cdot X_8 \cdot Y_6 \cdot X_7 \cdot Y_2 \cdot Z_5 \cdot X_3 \cdot Y_3 \cdot Y_3 \cdot X_5 \cdot Y_1 \cdot X_4 \cdot Z_3\}$, $\{Y_4 \cdot X_8 \cdot Y_6 \cdot X_7 \cdot Y_2 \cdot Z_5 \cdot X_3 \cdot Y_3 \cdot Y_3 \cdot X_5 \cdot Y_1 \cdot X_1 \cdot Z_4\}$, $\{Y_4 \cdot X_8 \cdot Y_6 \cdot X_7 \cdot Z_2 \cdot Z_1 \cdot Z_7 \cdot X_2\}$, $\{Y_4 \cdot X_8 \cdot Y_6 \cdot X_7 \cdot Y_2 \cdot Z_5 \cdot X_3 \cdot Z_1 \cdot Z_7 \cdot X_2\}$, $\{Y_4 \cdot X_6 \cdot X_7 \cdot Z_2 \cdot Y_3 \cdot Y_3 \cdot X_5 \cdot Y_1 \cdot X_4 \cdot Z_3\}$, $\{Y_4 \cdot X_8 \cdot Y_6 \cdot X_7 \cdot Z_2 \cdot Y_3 \cdot Y_3 \cdot X_5 \cdot Y_1 \cdot X_1 \cdot Z_4\}$. Используются для определения наиболее эффективных мер предупреждения аварии.

В диссертации были рассчитаны вероятности промежуточных событий и головного события, вероятность отключения КТП 10/0,4 кВ определилась величиной $2,6 \cdot 10^{-3}$. По примерной шкале балльных оценок критичности отказов отключения КТП "вполне вероятны", оценка вероятности составляет 7 баллов.

На основе анализов рисков многочисленных аварий, произошедших на реальных объектах СЭСП, был разработан алгоритм анализа и управления (менеджмента) интегрального риска СЭСП. Анализ риска должен происходить с применением мониторинга информации по установлению техногенных опасностей и их количественных оценок, включая расчет ущербов. Анализ риска обеспечивает методическую основу для прогнозирования и разработку мероприятий по снижению его уровня (рисунок 5). Действия, осуществляемые для достижения нормативного значения интегрального риска, можно рассматривать как управление или менеджмент риска.

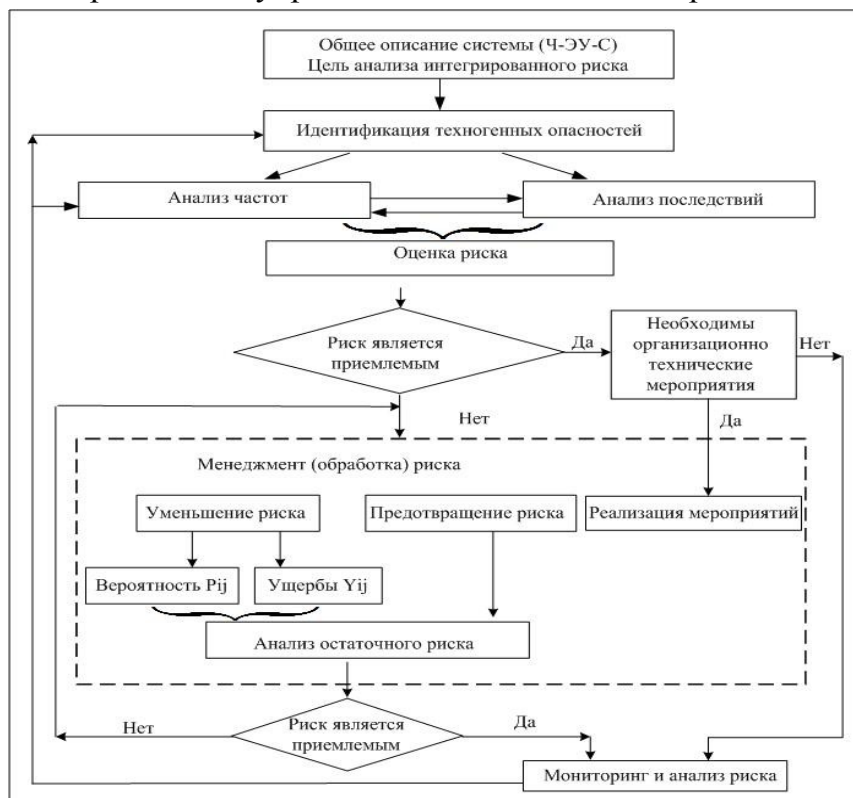


Рисунок 5 – Алгоритм анализа и управления интегрального риска СЭСП (ЭУ)

Процедура анализа и управления интегральным риском систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей может быть представлена следующими этапами.

Первый этап. Рассматривается модель структурно-морфологическая модель "Ч – ЭУ – С", и производится её семантическое описание, исследуются функции компонентов и их связь между собой. Обосновываются показатели, характеризующие техническую и экономическую эффективность системы в рамках теории рисков. Формулируются цели анализа интегрированного риска. Дается описание окружающей среды (внутренней – область непосредственного функционирования ЭУ с учётом человеческого фактора и внешней – включая правовые, организационные и экономические факторы).

Второй этап связан с задачами идентификации техногенных опасностей и негативной оценки их последствий. Виды потенциальных опасностей определяются и систематизируются (электрическая, электромагнитная, тепловая – основные виды угроз).

Третий этап – Проведение анализа интегрального риска, конечной целью которого является прогнозирование ущерба (потерь) конкретному хозяйствующему субъекту (человеку, окружающей среде, в целом обществу) от различного рода техногенных угроз.

Четвёртый этап – моделирование системы "Ч – ЭУ – С", включает учёт существенных факторов, определяющих возникновение и последствия опасностей, составление смысловых моделей и их формализацию с помощью графических диаграмм причинно-следственных связей (деревьев событий и исходов). В частном случае главным событием дерева в зависимости от поставленной цели может быть отказ или несчастный случай, а его "ветви" – набор соответствующих предпосылок, образующих причинные цепи.

Пятый этап – Частотный анализ, применяемый для оценки вероятности идентифицированных техногенных опасностей (ТО) системы "Ч – СЭСП – С", который производят, применяя статистический (сбор, обработка и анализ отказов, аварий, электротравм), экспертный (привлечение специалистов позволяет провести качественное или количественное ранжирование каждой идентифицированной опасности) или математический подходы. При недостатке данных применяют методы теории нечётких множеств, использующие лингвистические оценки или функции принадлежности).

Шестой этап – анализ последствий (исходов), направлен на оценку ущербов, вызванных недоотпуском продукции из-за перерывов электроснабжения, компенсационными издержками вследствие возникших аварий СЭСП, электротравматизмом людей с летальным или тяжёлым исходом (потерей трудоспособности), потерей привесов у животных и т. д. Оценку общего ущерба целесообразно производить в денежном эквиваленте, используя условное понятие "стоимости среднестатистической жизни человека" (жизнь человека не является рыночным товаром, однако материальные потери, связанные с гибелью людей, объективно существуют и могут быть монетарно оценены).

Седьмой этап – процедура вычисления риска *индивидуального* (оценивается вероятностью попадания человека под напряжение или прогнозируемой частотой смертности, инвалидности), *коллективного* (определяется ожидаемым числом смертельно травмированных за определённый период времени) и *социального* (определяется отношением числа погибших от электротравм к определённому множеству людей).

Заключительным этапом является процесс выбора и выполнения мероприятий для изменения риска (уменьшения значения или предотвращения). Результатом выполнения процедуры анализа и менеджмента риска может служить карта риска (рисунок 6), с помощью которой выбирается оптимальная стратегия, направленная либо на минимизацию значения интегрального риска R , при заданных ресурсных и финансовых ограничениях, либо на минимизацию затрат при выборе приемлемого (нормативного) значения интегрального риска

В диссертации рассмотрены две оптимизационных задачи по установке компенсирующих устройств для потребителей Волчихинского и Рубцовского РЭС.

При проектировании схемы электроснабжения, как правило, минимизируются денежные затраты на эту схему. Снижение потерь мощности за счет установки КУ уменьшает затраты на схему, однако и КУ требуют денежных затрат. Целевая функция представляет собой суммарные затраты на установку компенсирующих устройств и покрытие потерь активной мощности в схеме.

$$Z = z_0(Q_{k1} + Q_{k2}) + a_1(Q_1 + Q_2 - Q_{k1} - Q_{k2})^2 + a_2(Q_2 - Q_{k2})^2 \rightarrow \min,$$

где z_0 – удельные затраты на установку КУ, a_1 и a_2 – коэффициенты учитывающие R_1 , R_2 , U и удельные затраты на покрытие потерь активной мощности.

Были получены значения оптимальных суммарных затрат и значения Q_{k1} и Q_{k2} .

Вторая задача: Задана мощность компенсирующих устройств Q_k . Постановка задачи: требуется оптимальным образом распределить мощность Q_k между потребителями 1, 2, ... n в магистральной схеме электроснабжения (рисунок 7).

Эта задача решена методом Лагранжа, а также методом ОПГ (обобщенного приведенного градиента в программе Excel).

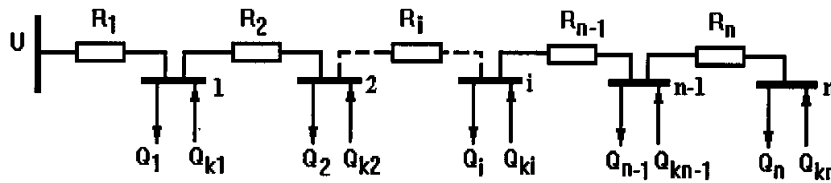


Рисунок – 7 Магистральная схема электроснабжения

Подлежащая минимизации целевая функция имеет следующий вид:

$$\Delta P = R_1 \left(\sum_1^n Q_i - \sum_1^n Q_{ki} \right)^2 / U^2 + R_2 \left(\sum_2^n Q_i - \sum_2^n Q_{ki} \right)^2 / U^2 + \dots \quad (5)$$

$$\dots + R_i \left(\sum_i^n Q_i - \sum_i^n Q_{ki} \right)^2 / U^2 + \dots + R_n (Q_n - Q_{kn})^2 / U^2 \rightarrow \min$$

Относительный минимум целевой функции ищется при ограничении

$$\sum_{i=1}^n Q_{ki} = Q_k \quad (6)$$

Функция Лагранжа имеет вид:

$$L = R_1 \left(\sum_1^n Q_i - \sum_1^n Q_{ki} \right)^2 / U^2 + R_2 \left(\sum_2^n Q_i - \sum_2^n Q_{ki} \right)^2 / U^2 + \dots \quad (7)$$

$$\dots + R_i \left(\sum_i^n Q_i - \sum_i^n Q_{ki} \right)^2 / U^2 + \dots + R_n (Q_n - Q_{kn})^2 / U^2 + \lambda \left(\sum_1^n Q_{ki} - Q_k \right) \rightarrow \min.$$

Для отыскания минимума функции L вычислим ее частные производные и приравняем их к нулю.

Из предпоследнего уравнения системы получим

$$Q_n - Q_{kn} = 0 \quad \text{или} \quad Q_{kn} = Q_n \quad (8)$$

Таким образом решение оптимизационной задачи показывает, что компенсирующие устройства следует устанавливать в соответствии с условиями полной компенсации реактивной мощности $Q_{ki} = Q_i$, начиная от конца магистральной схемы к ее началу до выполнения условия $\sum Q_{ki} = Q_k$, $i=1, 2, \dots n$. Если у i -го потребителя это условие выполнилось, то у потребителей 1, 2, ... $i-1$ компенсирующие устройства не устанавливаются.

Решение приведенных задач позволит собственникам сетей 10-0,4 кВ производить установку КУ (снижая потери электроэнергии в сети) при оптимальных затратах.

Следующей задачей оптимизации является выбор сечения проводов при строительстве новой линии в процессе развития сети между вариантом с большим сечением провода и с меньшим сечением. Первый вариант имеет большие капиталовложения на сооружение сети, но меньшие потери электроэнергии в процессе эксплуатации. Второй вариант наоборот, имеет малые капиталовложения, но при этом большие потери электроэнергии и большие издержки на возмещение этих потерь

Критерием выбора сечений ($F, \text{мм}^2$) проводов ВЛ является величина приведенных затрат (3) на строительство линии, зависящая от сечения. Результатом решения оптимизационной задачи ($3 \rightarrow \min, d3/dF = 0$) получаем сечение, соответствующее наименьшим расчетным затратам, $F = I_{нб} / j_{эк}$, и плотность тока, которую называют "экономической" ($j_{эк}$), при которой стоимость передачи электроэнергии по ВЛ минимальна, а потери в линии оптимальные.

На основе восстановленного подхода к выбору сечения проводов была рассчитана экономическая плотность тока для современных цен по известной формуле:

$$j_{эк} = \sqrt{\frac{\lambda(\alpha_э + \alpha_н) \cdot 1000}{3\rho\tau C \cdot 10^{-3}}}$$

где $\lambda = 1420 \text{ руб./мм}^2 \cdot \text{км}$ - коэффициент в линейной зависимости стоимости линии от ее сечения; $\rho = 31,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$ - удельное сопротивление алюминия; срок эксплуатации объекта 25 лет, $\alpha_э = 0,04$ - отчисления на амортизацию; $\alpha_н = 1/T_n$ - нормированный коэффициент эффективности капиталовложений, где $T_n = 8 \text{ лет}$ - нормированный срок окупаемости, стоимость электроэнергии, $C = 3,04 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч}$.

$$j_{эк} = \sqrt{\frac{\lambda(\alpha_э + \alpha_н)}{3\rho\tau C \cdot 10^{-3}}} = \sqrt{\frac{1420 \cdot 0,165 \cdot A^2}{3 \cdot 31,5 \cdot 3500 \cdot 3,04 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^4}} = \sqrt{0,23 \frac{A^2}{\text{мм}^4}} = 0,48 \text{ А/мм}^2.$$

В таблице 7 приведены значения экономической плотности тока, рассчитанные для различных тарифов.

Таблица 7 – Экономическая плотность тока для различных тарифов

Стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч	Экономическая плотность тока, $j_{эк}$, А/мм ²	Стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч	Экономическая плотность тока, $j_{эк}$, А/мм ²
6,00	0,34	4,00	0,42
5,50	0,36	3,50	0,45
5,00	0,38	3,00	0,48
4,50	0,40	2,50	0,53

Анализ таблицы 7 показывает, что расчетная экономическая плотность тока для разных тарифов/регионов существенно различается и меньше предписанной ПУЭ величины более, чем в два раза.

Влияние рыночных условий. В условиях рыночной экономики срок окупаемости может определяться интересами собственников энергокомпаний, инвесторов или расчетной ставкой банка на капитал. Автором была рассчитана экономическая плотность тока с учетом различных источников инвестирования (реинвестирование, эмиссия ак-

ций, выпуск облигаций, ссуда, взятая в банке), инфляции и дисконтирования для различных тарифов и сроков окупаемости 6, 4 и 3 года, учётной ставки банка в 20 и 30% и принятой инфляции в 12%, таблица 8.

Таблица 8 – Экономическая плотность тока с учетом дисконтирования, инфляции и учетной ставки банка

Тариф руб./кВт·ч	Экономическая плотность тока, А/мм ²			
	при учётной ставке банка			
	30 %	20 %		
	Окупаемость			
	6 лет	6 лет	4 года	3 года
6,00	0,55	0,49	0,56	0,60
5,00	0,60	0,54	0,61	0,66
4,00	0,67	0,60	0,68	0,74
3,00	0,78	0,70	0,78	0,85

Анализ таблицы 8 показывает, что на величину $j_{эк}$ существенное влияние оказывает желаемый срок окупаемости, снижение последнего с 6 до 4 и 3 увеличивает $j_{эк}$ на 12 и 22%, рост учётной ставки также увеличивает $j_{эк}$.

Очевидно, что при прочих равных условиях определяющее значение на величину $j_{эк}$ оказывает *соотношение стоимости проводникового материала и электроэнергии*, сформированных на свободном рынке.

Таким образом, существующая тенденция изменения цен позволяет сделать *уверенный прогноз на дальнейшее снижение величины экономической плотности тока*.

В диссертации был рассмотрен вероятностно-статистический метод оптимизации на примере стохастического программирования. Система электроснабжения сельских потребителей (как отмечалось в гл. 2) сложная, динамичная, функционирующая стохастически и неопределённо, не должна исследоваться детерминистическими методами, которые могут приводить либо к грубым допущениям, либо к трудно интерпретируемым результатам. В настоящее время в задачах многокритериальной оптимизации при неопределённой информации наиболее применимы методы теории нечётких множеств.

Основные методологические проблемы многокритериальной оптимизации связаны с многоуровневостью системы частных критериев, их неравноценностью, необходимостью одновременного учета как количественно, так и качественно заданных показателей.

По содержательному смыслу ранги a_i - это значения вкладов соответствующих частных критериев, а их совокупность $W = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ отвечает собственному вектору матрицы парных сравнений A . Поэтому вектор W может быть найден как решение уравнения $AW = \lambda W$, где λ - собственное значение матрицы A . Используя условия нормализации $\sum_{i=1}^n a_i / n = 1$ и применяя известные методы отыскания собственных векторов, можно рассчитать численные значения рангов a_i . В реальных условиях элементы матрицы парных сравнений неточны из-за того, что они отражают субъективное

мнение эксперта. В этих условиях значение W можно вычислить как вектор, минимизирующий функционал:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} - \frac{a_i}{a_j} \right)^2 \rightarrow \min. \quad (9)$$

При этом искомые значения $a_1, a_2, \dots, a_n$ являются решением оптимизационной задачи:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} a_j - a_i)^2 \rightarrow \min; \quad \sum_{i=1}^n a_i = n. \quad (10)$$

Широкое распространение для отыскания рангов критериев на основе матрицы парных сравнений получил приближенный метод, предложенный Томасом Саати. Этот подход заключается в отыскании приближенных значений вектора рангов, как среднегеометрических величин каждой строки матрицы парных сравнений. Полученные среднегеометрические значения собственного вектора нормализуются делением на сумму средних геометрических:

$$a'_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, \quad a_i = \frac{a'_i}{\sum_{i=1}^n a'_i}. \quad (11)$$

Проведем сравнение двух методик ранжирования: Томаса Саати (11) и методики решения задачи оптимизации (10) на реальном примере выбора мероприятий по снижению потерь электроэнергии в двух районах электрических сетей.

В реальных условиях эксплуатации снижение потерь электроэнергии при ее передаче реально увеличивает прибыль компаний. Поэтому, выбор наиболее эффективных мероприятий по снижению потерь, является весьма актуальным для всех без исключения распределительных энергоснабжающих компаний.

В диссертации рассмотрена задача принятия решения по выбору мероприятий по снижению потерь электроэнергии. Сопоставление двух подходов выполнялись на основе матрицы эффективности мероприятий по снижению потерь электроэнергии.

Для оценки эффективности мероприятий по снижению потерь электроэнергии перед их реализацией необходимо их проранжировать. В результате анализа экспертами компании выставлены ранги мероприятий и получена матрица парных сравнений, которая представлена в таблице 9.

Информативным показателем достоверности определения рангов является индекс согласованности (ИС) матрицы парных сравнений. Чем более парные сравнения, тем меньше ИС. В таблице 10, приведены результаты расчета рангов и ИС для рассматриваемого примера на основе двух сравниваемых методик.

Как следует из анализа результатов, согласованность оценок при использовании методики оптимизации существенно выше, чем при использовании приближенного метода Т. Саати (значения ИС ниже, таблица 10).

Доказано, что методика решения оптимизационной задачи (10) по сравнению с традиционным приближенным подходом имеет существенные преимущества.

Таблица 9 – Матрица парных сравнений частных критериев эффективности мероприятий по снижению потерь

Показатель эффективности мероприятий	Ввод КУ на ПС сетевой компании	Выравнивание нагрузок фаз в сетях 0,4 кВ	Реконструкция ВЛ с загрузкой по ЭПТ*	Отключение в режимах малых нагрузок трансформаторов	Замена приборов учета на улучшенные	Замена измерительных трансформаторов	Установка на ПС средств АСКУЭ	Перевод на высшую ступень напряжения
Ввод КУ на ПС сетевой компании	1	6	3	6	7	6	9	1/3
Выравнивание нагрузок фаз в сетях 0,4 кВ	1/6	1	1/4	1/2	3	3	2	1/8
Реконструкция ВЛ с загрузкой по ЭПТ*	1/3	4	1	3	3	4	5	1/5
Отключение в режимах малых нагрузок одного из трансформаторов	1/6	2	1/3	1	3	3	5	1/8
Замена приборов учета на улучшенные	1/7	1/3	1/3	1/3	1	1/2	4	1/7
Замена измерительных трансформаторов (повышение класса точности)	1/6	1/3	1/4	1/3	2	1	3	1/7
Установка на ПС средств АСКУЭ	1/9	1/2	1/5	1/5	1/4	1/3	1	1/9
Перевод ВЛ на высшую ступень напряжения	3	8	5	8	7	7	9	1

* ЭПТ - экономическая плотность тока; КУ - компенсирующие устройства.

Таблица 10 – Ранги и индексы согласованности в задаче выбора мероприятий по снижению потерь электроэнергии

Частные критерии оценки мероприятий по снижению потерь	Ранги	
	Метод Т. Саати	Задача оптимизации
Ввод КУ на ПС сетевой компании	0,257	0,222
Выравнивание нагрузок фаз в сетях 0,4 кВ	0,053	0,049
Реконструкция ВЛ с загрузкой по ЭПТ*	0,126	0,102
Отключение в режимах малых нагрузок одного из трансформаторов	0,073	0,053
Замена приборов учета на улучшенные	0,038	0,044
Замена измерительных трансформаторов (повышение класса точности)	0,039	0,046
Установка на ПС средств АСКУЭ	0,020	0,031
Перевод ВЛ на высшую ступень напряжения	0,393	0,452
	ИС = 0,137	ИС = 0,122

В пятой главе представлена методология расчета обобщенная эффективности функционирования распределительных сетей в режиме *on-line* с применением многокритериальной модели на основе теории нечётких множеств и наличии реальных возможностей получения информации об отказах оборудования и его режимах работы.

Для мониторинга эффективности СЭС возьмём совокупность следующих технических и экономических факторов: надежность электроснабжения, экономичность сети, качество электроэнергии и безопасность, которые были выбраны и обоснованы как критерии эффективности СЭСП (глава 2). Будем считать их факторами первого порядка.

Фактор «Надежность» в режиме *on-line* можно выразить через технические характеристики надежности: параметр потока отказов, частоту плановых ремонтов, время

восстановления, время простоя, вероятность безотказной работы и т.д. Для возможности учёта ущербов от техногенных рисков и недоотпуска электроэнергии, будем выражать надежность через количество и длительность перерывов электроснабжения и количество недоотпуска электроэнергии. Будем считать их факторами второго порядка.

«Экономичность» сети будем рассматривать с точки зрения пропускной способности и уровня потерь электроэнергии, которые зависят от нагрузки и сопротивления участка сети. Нагрузку при известном сечении провода удобно выразить через плотность тока, j , A/mm^2 ($j = I / F$). Для фактора первого порядка «Экономичность» к факторам второго порядка отнесем «Плотность тока», «Длина ВЛ» и добавим фактор «Пропускная способность», которую будем выражать через $tg \varphi$, ($tg \varphi = Q/P$, рисунок 8).

В набор факторов второго порядка, описывающих качество электроэнергии, примем следующие: отклонение напряжения, несинусоидальность напряжения и несимметрию напряжения. Фактор «Электробезопасность»: мероприятия по обеспечению электробезопасности включают в себя установку заземляющих устройств, повторное заземление опор ВЛ, выравнивание потенциалов, устройство защитного отключения, уравнивание потенциалов и т.д.



Рисунок 8 – Причинно-следственная диаграмма

Регулярному контролю в процессе эксплуатации ВЛ-10 кВ подлежит величина сопротивления защитного заземления, которую будем считать фактором второго порядка. В соответствии с обозначенными факторами построим причинно-следственную диаграмму, рисунок 9, для выявления взаимосвязи основных и второстепенных факторов и их воздействия на конечный результат.

Рассмотрим формализованное описание показателя для фактора «Надежность». Для воздушных линий 10 кВ средняя частота отказов, ω , составляет 7,6 устойчивых отказов на 100 км в год, следовательно, функция желательности для фактора «Количество отказов» конструируется в виде несимметричной трапеции, рисунок 9,а. Основываясь на опыте ведущих стран, где длительность перерыва 7-10 часов, зададим желаемую длительность τ перерыва электроснабжения не более 10 часов (желательно иметь перерыв не более 10 ч в год). Тогда функция желательности будет иметь форму, рисунок 9,б. Не опущенная за время отключения τ электроэнергия определится через $P_{max} \cdot \tau$. Функция желательности для фактора «Недоотпуск электроэнергии» будет иметь вид рисунок 9,в.

Для фактора "Экономичность" плотность тока желательно иметь в пределах 0,6-0,8 А/мм² для Алтайского региона. С учетом последнего функция желательности конструируется в форме трапеции, (рисунок 9, з). Оптимальной длиной электропередачи 10 кВ считается не более 8 - 12 км, (рисунок 9 д). Для фактора «Пропускная способность» значение реактивной мощности зададим через $tg\varphi$, ($tg\varphi = Q/P$) нормативное значение которого для сети 10 кВ составляет не более 0,4 ($tg\varphi \leq 0,4$), рисунок 9, е.

Функции желательности для "Качество электроэнергии" причинно-следственной диаграммы формировались экспертами аналогично. Принимались за желательные значения величины (отклонения напряжения, коэффициентов несимметрии и несинусоидальности), предписанные стандартом, рисунок 9 ж, з, и.

Для фактора «Электробезопасность» мероприятия по обеспечению электробезопасности можно определить через один главный критерий, например, защитное заземление, которое выразим через сопротивление $R_{зз}$.

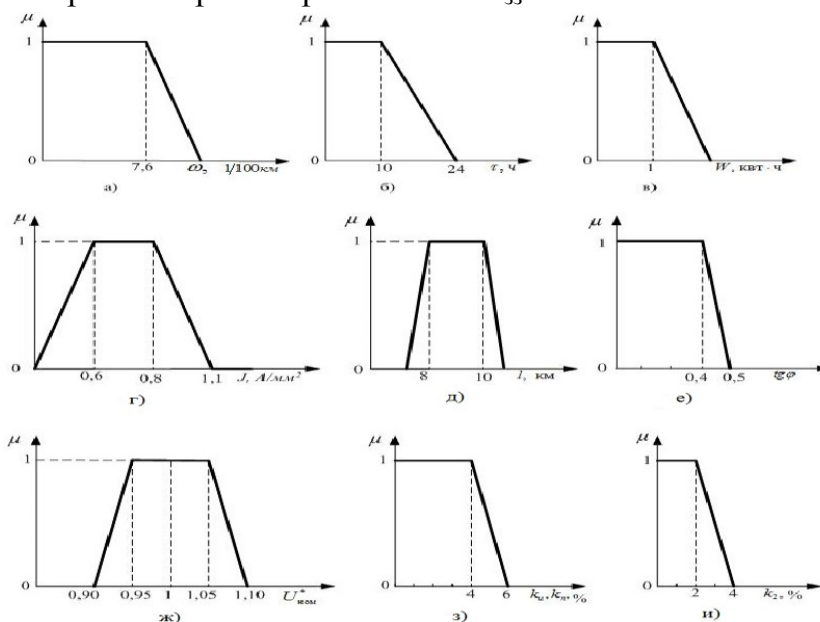
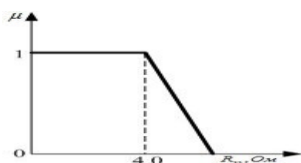


Рисунок 9. Функции желательности для различных факторов



Сопротивление защитного заземления для сетей 10 кВ не должно превышать величины, равной 4 Ом (12). Исходя из сказанного функция желательности может быть представлена рисунок 10:

$$\mu(R_{зз}) = \begin{cases} 0, R_{зз} > 0,4 \text{ Ом} \\ 1, R_{зз} \leq 0,4 \text{ Ом} \end{cases} \quad (12)$$

Рисунок 10 – Функции желательности для фактора «Защитное заземление»

Для иллюстрации предлагаемой методики приняты такого рода зависимости; значения критериев по оси абсцисс (рисунки 9, 10,) при $\mu = 0$ могут быть другими (выбраны по решению экспертов).

Далее производится ранжирование и строятся матрицы парных сравнений частных критериев, например, для критерия "Надёжность", таблица 11.

Таблица 11 Матрица парных сравнений и ранги факторов второго уровня, входящих в критерий «Надежность»

Показатель	Количество отказов	Длительность перерыва электро-энергии	Недоотпуск электроэнергии	Ранг
Количество отказов	1	3	5	1,986
Длительность перерыва электроэнергии	1/3	1	5	0,709
Неотпуск электроэнергии	1/5	1/5	1	0,305

Далее, аналогичным образом были построены матрицы парных сравнений и ранги факторов второго уровня для основных факторов "Экономичность", "Электробезопасность", "Качество электроэнергии" и матрица парных сравнений и рассчитаны ранги для основных факторов, таблица 12.

Таблица 12 – Матрица парных сравнений факторов первого уровня и ранги основных критериев эффективного функционирования сетей

	Надёжность	Экономичность	Качество электроэнергии	Электробезопасность	Ранги	Ранги (по методике Саати)
Надёжность	1	3	6	4	2,238	2,142
Экономичность	1/3	1	5	3	0,926	1,100
Качество электроэнергии	1/6	1/5	1	1/3	0,287	0,239
Электробезопасность	1/4	1/3	3	1	0,505	0,520

На последнем этапе проводится (с учетом найденных рангов) свертывание частных критериев в единый глобальный критерий, значение которого лежит в пределах от 0 до 1 и характеризует эффективность функционирования сетей с учетом надёжности, экономичности, качества электроэнергии и электробезопасности.

На рисунке 11, а) приведён фрагмент результата оценки эффективности работы сетей 10 кВ, рассчитанный программой для ЭВМ, разработанной на основе приведённой методики.

№	Диспетчерское наименование	ЭФФЕКТИВНОСТЬ				Итог
		Надёжность	Экономичность	Качество электроэнергии	Электробезопасность	
6	ВЛ-25-6	0.625	0.322	0.096	0.010	0.409
9	ВЛ-25-9	1.000	0.258	0.088	1.000	0.589
11	ВЛ-9-3	0.893	0.77	0.096	1.000	0.767
22	ВЛ-42-7	1.000	0.010	0.105	0.010	0.430
23	ВЛ-52-1	1.000	0.817	0.298	1.000	0.851
25	ВЛ-52-3	0.525	0.770	0.810	0.010	0.632

а)

Диспетчерское наименование	ЭФФЕКТИВНОСТЬ				
	Надежность	Экономичность	Качество электро- энергии	Электробезопасность	Итог
ВЛ-25-6	0.625	0.322	0.096	0.010	0.409
ВЛ-42-7	1.000	0.010	0.105	0.010	0.430
ВЛ-52-2	0.893	0.002	0.052	1.000	0.430

б)

Рисунок 11 – Отчет об эффективности функционирования ВЛ 10 кВ РЭС "Волчихинский" на 30.06.2015: а – общие сведения; б – худшие результаты по РЭС

Полученные *количественные оценки критериев эффективности* (Н, Э, Б, К) и *обобщенной эффективности* исследуемых линий послужат научным обоснованием для формирования планов ремонтных работ Волчихинского РЭС.

Анализ результата произведённой оценки эффективности функционирования ВЛ 10 кВ района электрических сетей (РЭС) ОАО «Алтайэнерго» в количестве 25 линий-показал, что эффективность определилась величиной от 0,409 до 0,851. У 29 % линий эффективность оказалась ниже 0,5. Результаты модели (рисунок 12, а) на 96 %, и (рисунок 12, б) на 100 % совпали с оценками экспертов, что позволяет считать представленную модель достаточно достоверной.

Таким образом, в условиях неопределенной и недостаточной информации производить оценку эффективности функционирования сетей можно с использованием функций желательности; использование модели, основанной на экспертных оценках с применением функций желательности, дает оценку эффективности функционирования СЭС в диапазоне приемлемой точности.

В шестой главе предложены методы и технические средства (1-5) для повышения эффективности систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей в аспектах: надежности, экономичности и качества электроэнергии (в плане отклонения напряжения, несимметрии и несинусоидальности напряжения).

1.Используя данные проведенного автором за последние пять лет мониторинга отказов ВЛ 10 кВ (400 линий) определена средняя частота отказов $\omega = 21, 1/100$ км в год, - 21,1 устойчивых отказов на 100 км в год. Произведенный корреляционный анализ выявил значимые факторы, влияющие на частоту отказов (ветер, $r = 0.77$ температура воздуха, $r = 0.6$ и время года, $r = 0.47$). Даны рекомендации по изменению пунктов ПУЭ, направленные на повышение надёжности ВЛ 10 и 0,4 кВ.

2. *Режимы реактивной мощности.* Известно, что передача значительной реактивной мощности по распределительным сетям вызывает дополнительные потери активной мощности, возникают дополнительные потери напряжения, снижается пропускная способность сечения проводов и мощности трансформаторов. При $tg\varphi = 0,5$ суммарные потери возрастают до 20 % по сравнению с режимом отсутствия перетоков ($tg\varphi = 0$). Применение компенсирующих устройств даёт наибольшую энергетическую эффективность на рубль капиталовложений, и в большинстве европейских стран коэффициент реактивной мощности поддерживается на уровне 0,3.

Исследование режимов работы сельских линий 10 кВ, принадлежащих распределительной сетевой компании Сибири показывает, что лишь 7% линий имеют регламентированное значение $\text{tg } \varphi \leq 0,4$, а 93 % линий имеют значение тангенса выше предписанных и среднее значение тангенса составляет 0,62. Для сравнения можно отметить, что в США, например, распределительные электрические сети в режиме



максимальных нагрузок работают без пере-
токов реактивной мощности с $\text{tg } \varphi = 0$.

На рисунке 12 представлена упорядоченная диаграмма тангенса «фи» ($\text{tg } \varphi$) исследованных линий (200 шт.), расположенных в порядке возрастания коэффициента.

Рисунок 12 – Диаграмма распределения тангенса «фи» ($\text{tg} \varphi = Q/P$) в линиях 10 кВ

Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что режим реактивной мощности в распределительных сетях не контролируется и не регулируется. Применение конденсаторных батарей и симметрирующих компенсирующих устройств позволит при эксплуатации сетей 10 – 0,4 кВ снизить потери электроэнергии (оценочно на 12,8% от существующих) и повысить её качество в плане снижения потерь напряжения (на 14,6%), а также применять современные технологии активно-адаптивных сетей (Smart Grid).

На основании подробного анализа места установки и величины КУ сделан вывод: *в сетях до 1000 В оптимальной является полная компенсация реактивной мощности с установкой КУ в конце линии.* Полученные выводы подтверждаются решением оптимизационных задач распределения компенсирующих устройств в системах сельского электроснабжения (глава 4).

3. Наиболее массовым источником помех, влияющих на качество электроэнергии, являются силовые полупроводниковые преобразователи и лампы.

Наибольшее влияние на форму напряжения оказывают нечетные гармоники: 5, 7, 11, а также гармоники, кратные трем. Разработана модель влияния на питающую сеть тиристорного выпрямителя, выполненная в системе схематического моделирования Design-PSpice по трехфазной мостовой схеме с целью выбора параметров фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ).

Функциональная схема модели, созданная в среде графического редактора Schematics, представлена на рисунке 13.

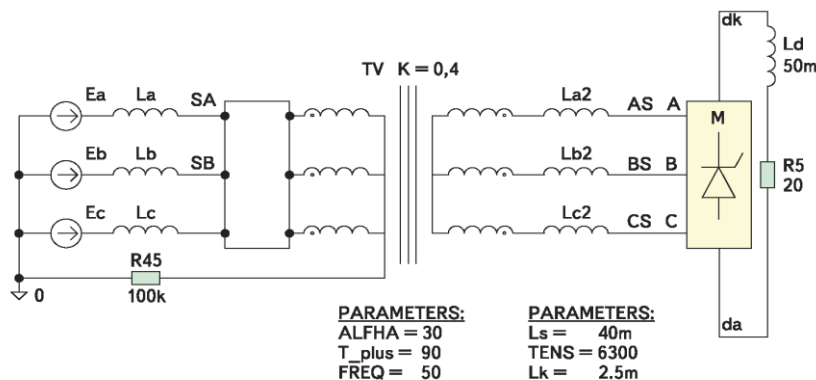


Рисунок 13 – Функциональная схема модели для анализа влияния на питающую сеть тиристорного выпрямителя, выполненного по трехфазной мостовой схеме

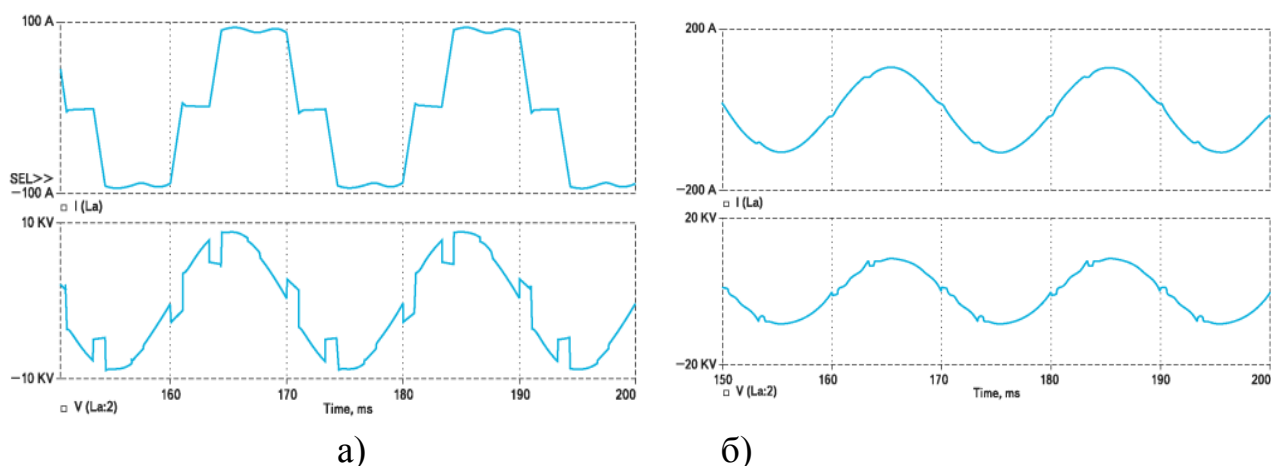


Рисунок 14 – Эпюры кривых тока и напряжения: а) без ФКУ; б) с ФКУ

На рисунке 14 показаны эпюры тока и напряжения с фильтрокомпенсирующими устройствами (рисунок 14, б) и без них (рисунок 14, а).

Модель ФКУ представляет собой шесть графических символов трехфазной схемы ФКУ, соединенных параллельно, настроенных на пятую, седьмую, одиннадцатую, тринадцатую гармоники (F1,F2, F3, F4, соответственно), рисунок 15.

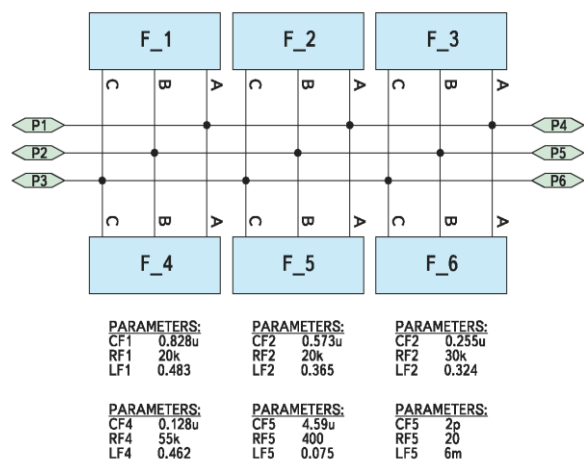


Рисунок 15 - Функциональная схема блока фильтрокомпенсирующего устройства

При наличии отклонения показателей качества электроэнергии по коэффициентам k_u и $k_{u(n)}$ использование данной модели позволяет подобрать требуемые параметры фильтрокомпенсирующих установок, использование которых способствует снижению потерь электроэнергии на предприятии.

4. Обеспечение энергоэффективности за счет доставки потребителям только «полезной» энергии для выполнения их функциональных задач. Одним из способов повышения энергоэффективности можно рассматривать методику обеспечения разного рода потребителей тем видом энергии и энергией того качества, которое необходимо именно этому потребителю для выполнения его функциональных задач. Автором произведена реконструкция понятия "полезный отпуск" с учётом того, как отзываются потребители электроэнергии широкого пользования (асинхронные двигатели, выпрямители, нагреватели, осветительные приборы и т.д.) на различные типы постав-

ляемой энергии (прямой, обратной, нулевой последовательности, высших гармоник). Исключение не полезной для потребителя электроэнергии возможно в случае использования активных и пассивных фильтров, что позволяет применять технологию *гибких линий электропередачи* (FACTS - flexible alternative current transmission system).

5. Методика оптимизации технических потерь при реконструкции сельских распределительных сетей 10 - 0,4 кВ с учетом экономической плотности тока.

Основной задачей реконструкции является приведение электрической сети в соответствие с пропуском по ней электроэнергии. Для этого предлагается все оборудование сетей разделить на две группы: эксплуатируемое и обслуживаемое. Часть оборудования, имеющего малую загрузку в резервируемых схемах, следует вывести из эксплуатации и реализовать, утилизировать. Оставшимся линиям обеспечивается повышенная нагрузка, благодаря этому эксплуатационные показатели линий приближаются к оптимальным. Следует производить реконструкцию наиболее загруженных линий на основании коэффициента использования оборудования и приведенной к сегодняшнему дню экономической плотности тока $j_{\text{эк}}$

$$k_{\text{исп}} = \frac{F_{\text{эк}}}{F}, \text{ где } F_{\text{эк}} = \frac{I_{\text{ср}}}{j_{\text{эк}}}; j = \frac{I_{\text{ср}}}{F}. \quad (13)$$

При оптимизационной постановке задачи следует ввести целевую функцию в виде суммы квадратов сечений проводов ВЛ от значений, определяемых экономической плотностью тока:

$$L = \sum (F - F_{\text{эк}})^2 \rightarrow \min.$$

На основании применения этого подхода к распределительным сетям 10 кВ компании ПАО "МРСК Сибири - "Алтайэнерго" (исследованы 110 линий) обоснованы рекомендации вывести из эксплуатации 9 линий и осуществить реконструкцию 22 наиболее загруженных линий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам теоретических и экспериментальных исследований сделаны следующие общие выводы:

1. Задачи управления функционированием сложных систем (СЭС) относятся к классу трудно формализуемых, решаемых в нечеткой среде, в условиях неопределённости исходной информации, где не справляются детерминистические и вероятностные методы. Безусловно, должны использоваться современные методы теории нечетких множеств, включающие построение функций принадлежности параметров на основе экспертных оценок.

2. Сформулирована единая научно обоснованная методология, устанавливающая закономерности возникновения и развития техногенных опасностей в СЭС. Разработаны базовые принципы построения человеко-машинной системы, представляющей совокупность трех компонентов (человек, электроустановка, среда), объединенных общей целью и функциональными связями, предназначенных для изучения и описания причинно-следственных цепей, приводящих к возникновению опасностей. Ос-

новой целью изучения этой системы является выработка мер предупреждения негативных происшествий и снижения их последствий.

3. Эффективность функционирования человекомашинной системы в условиях множества детерминированных, случайных и неопределенных факторов предложено оценивать с помощью обобщенного показателя, в основу которого положено мультипараметрическое описание динамического состояния системы, учитывающей, наряду с параметрами надежности, факторы, характеризующие безопасность, экономичность и качество электроэнергии. *Дано определение и формальное выражение обобщенного показателя эффективности, $\Phi(t)$.* Система "Ч-СЭСП-С" представлена в виде сложной, динамичной, стохастической системы, функционирующей в условиях неопределенности как исходных параметров, так и критериев, в которой постоянно взаимодействуют между собой технические устройства, человек, окружающая среда и информационные потоки.

4. Разработан алгоритм управления уровнем риска путем мониторинга информации по установлению техногенных опасностей и их количественных оценок. На основе логико-графической модели "дерево событий" с учетом экспертных оценок сформированы таблицы вероятностей иницирующих факторов и рассчитаны количественные оценки вероятности (аварий) отказа элементов СЭСП.

5. Разработан методологический аппарат применения методов анализа опасности и оценки рисков при эксплуатации электрических сетей, и разобраны примеры для наиболее часто повреждаемых элементов в "Методических рекомендациях по оценке техногенных рисков в электроустановках на объектах АПК". Разработанные рекомендации позволяют производить менеджмент техногенного риска, повысить эффективность системы планово-предупредительных и ремонтных работ, надежность систем электроснабжения сельских потребителей и снизить количество отказов и аварий.

6. Для оценки эффективности функционирования сельских распределительных сетей (при решении задач многокритериальной оптимизации) в процессе свёртки частных критериев в единый оценочный функционал обосновано применение функций желательности, полученных в экспертной системе (при этом формально включаются знания экспертов, выраженные вербальными категориями типа "много", "мало", "часто", более предпочтительно" и т.п.).

7. В результате исследований произведено уточнение расчета экономической плотности тока; в расчет включены дополнительные факторы: степень инфляции, задаваемый срок окупаемости, особенности источников инвестирования. Использование полученных расчетных значений при выборе сечения проводов в процессе проектирования или реконструкции распределительных сетей 10-0,4 кВ позволит снизить потери электроэнергии при её передаче.

8. На основании выполненных исследований показано, что расчетная экономическая плотность тока (ЭПТ) для разных регионов существенно различается и меньше предписанной ПУЭ величины более, чем в два раза; при прочих равных условиях определяющее значение на величину ЭПТ оказывает *соотношение стоимости проводникового материала и электроэнергии*, сформированных на свободном рынке.

Существующая в настоящее время тенденция изменения цен позволяет сделать *уверенный прогноз на дальнейшее снижение величины экономической плотности тока*. Вышеизложенные выводы послужили основанием для предложения по изменению таблицы 1.3.36 пункта 1.3.25 главы 1.3 раздела 1 ПУЭ на полученные значения экономической плотности тока для различных регионов.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. **Черкасова Н.И.** Моделирование, анализ и оптимизация потерь в распределительных электрических сетях 10-0,4 кВ: монография [Текст] / Н.И. Черкасова/ Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 95 с.
2. **Черкасова Н.И.** Техногенные риски в сельских электрических сетях: монография [Текст] /О.К. Никольский, Н.П. Воробьёв, А.Ф. Костюков, Г.А. Гончаренко, Н.И. Черкасова/ Барнаул, 2013.
3. **Черкасова Н.И.** Многокритериальная оценка эффективности функционирования сельских электрических сетей 10-0,4 кВ в условиях неопределенности: монография [Текст]/Н.И. Черкасова/Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. 160с.

Публикации в изданиях, включённых в перечень ВАК РФ

4. **Черкасова Н.И.** Оценка плотности тока в проводах сельских линий 10-0,4 кВ в современных условиях/ Н.И. Черкасова //Электрические станции. – М., 2014. - № 5. – С. 50-54.
5. **Черкасова Н.И.** Применение функций желательности для оценки эффективности электрических сетей 10 кВ/ Н.И. Черкасова //Электрические станции. – М., 2015. - № 9 . – С. 53-59.
6. **Черкасова Н.И.** Повышение энергоэффективности системы сельского электроснабжения компенсирующими устройствами/ Н.И. Черкасова // Механизация и электрификация сельского хозяйства – М., 2013. - № 6. – С. 17 - 19.
7. **Черкасова Н.И.** Принципиальная схема системы сельского электроснабжения, дифференцированная по уровням напряжения//Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – М., 2017. - № 1– С. 8-11.
8. **Черкасова Н.И.** Методика многокритериальной оценки эффективности функционирования сельских электрических сетей 10-0,4 кВ/ Н.И. Черкасова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск, 2013 № 2. – С. 248 - 253.
9. **Черкасова Н.И.** Проблемы энергоаудита агропромышленных компаний/ Н.И. Черкасова //Вестник КрасГАУ. Красноярск. 2012, № 1. С. 163-165.
10. **Черкасова Н.И.** Стратегия развития существующих сельских распределительных сетей 10-0,4 кВ. / Н.И. Черкасова//Техника в сельском хозяйстве. М. № 5. 2013.С.12-14.
11. **Черкасова Н.И.** Экономическая оценка надежности сельских электрических сетей/ Н.И. Черкасова // Вестник АГАУ.– Барнаул, 2013. - № 6. – С. 115-118.
12. **Черкасова Н.И.** Применение методов анализа опасности и оценки риска в сетях 10 - 0,4 кВ/ Н.И. Черкасова//Ползуновский вестник. – Барнаул, 2014. - № 8. – С. 202-211.

13. **Черкасова Н.И.** Анализ состояния сельских электрических сетей 10 кВ в свете мониторинга отказов / Н.И. Черкасова // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2013. - № 4. – С. 49-55.
14. **Черкасова Н.И.** Ранжирование частных критериев в условиях неопределенности в задачах принятия решений. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии. / Н.И. Черкасова // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2012. - № 4. – С. 59-63.
15. **Черкасова Н.И.** Способ диагностики электропроводок зданий / Н.И. Черкасова // Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2012. – №11. - С. 171-176.
16. **Черкасова Н.И.** Экологическое влияние сельских электрических сетей 10-0,4 кВ на окружающую среду/ О.К. Никольский, Н.И. Черкасова// Ползуновский вестник. – Барнаул, 2012. - № 4. – С. 55 - 58.
17. **Черкасова Н.И.** Оценка риска сельских электрических сетей/О.К. Никольский, Н.И. Черкасова//Техника в сельском хозяйстве. –М., 2013.- № 6.–С.21-23.
18. **Черкасова Н.И.** Проблемы комплексного повышения эффективности электроснабжения сельских потребителей 1 ч./ О.К. Никольский, Н.И. Черкасова// Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2013. - № 6. С. 218-221.
19. **Черкасова Н.И.** Математическая модель травмоопасных ситуаций/ Г.А. Гончаренко, О.К. Никольский, Н.И. Черкасова// Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2013. - № 8. С. 198-202.
20. **Черкасова Н.И.** Алгоритм управления рисками сельских электрических сетей//О.К.Никольский, Н.И. Черкасова//Вестник АГАУ.–Барнаул, 2013.-№7 С.86-90.
21. **Черкасова Н.И.** Проблемы комплексного повышения эффективности электроснабжения сельских потребителей 2 ч./ О.К. Никольский, Н.И. Черкасова// Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2013. - № 9. С. 215-218.
22. **Черкасова Н.И.** Принципы интегральной оценки безопасности электроустановок// О.К. Никольский, А.Ф. Костюков, Н.И. Черкасова //Вестник ИрГСХА. – Иркутск, 2014. - № 62. – С. 103-111.
23. **Черкасова Н.И.** Теоретические основы техногенных рисков опасности электроустановок потребителей// О.К. Никольский, А.Ф. Костюков, Н.И. Черкасова //Вестник ИрГСХА. – Иркутск, 2014. - № 64. – С. 93-102.
24. **Черкасова Н.И.** Критериальная оценка рисков сельских электрических сетей//А.Ф. Костюков, Н.И. Черкасова, О.К. Никольский// Вестник АГАУ. – Барнаул, 2013. - №7. С. 86-90.
25. **Черкасова Н.И.** Анализ интегрированного риска электротехнических человеко-машинных систем/ А.Ф. Костюков, Н.И. Черкасова// Вестник АГАУ. – Барнаул, 2014. - №12(122). С. 150-155.
26. **Черкасова Н.И.** Проблемы неопределенности при анализе рисков электроустановок/О.К. Никольский, А.Ф. Костюков, Н.И. Черкасова // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2014. - № 4. – С. 140-146.
27. **Черкасова Н.И.** Анализ методов диагностики технического состояния и ресурса электроустановок/ А.Ф. Костюков, О.К. Никольский, Н.И. Черкасова // Вестник АГАУ. – Барнаул, 2014. - №1(111). С. 100-103.
28. **Черкасова Н.И.** К вопросу о формировании экспертных систем оценки интегрального риска электроустановок(принципы построения имитационной модели)/

О.К. Никольский, Н.П. Воробьев, А.Ф. Костюков, Н.И. Черкасова // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2014. - № 4-1 . – С. 100-106.

29. **Черкасова Н.И.** Основы вероятностного анализа риска электроустановок с учетом фактора неопределённости/А.Ф. Костюков, О.К. Никольский, Н.И. Черкасова // Вестник АГАУ. – Барнаул, 2014. - №3(113). С. 102-106.

30. **Черкасова Н.И.** Сценарное моделирование риска сельских электрических сетей/А.Ф. Костюков, О.К. Никольский, Н.И. Черкасова // Вестник АГАУ. – Барнаул, 2014. - №9 (119). С. 117-122.

31. **Черкасова Н.И.** Основные подходы к анализу интегрированного риска человека - машинных систем/А.Ф. Костюков, Н.И. Черкасова // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2014. - № 4-1 . – С. 86-92.

32. **Черкасова Н.И.** Метод прогнозирования техногенных рисков на основе теории нечетких множеств в системах сельского электроснабжения/О.К. Никольский, Н.П. Воробьев, А.Ф. Костюков, Н.И. Черкасова // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2014. - № 4-1 . – С. 70-78.

33. **Черкасова Н.И.** Основы и механизмы управления рисками электроустановок объектов АПК /Н.И. Черкасова, А.Ф. Костюков, О.К. Никольский // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2014. - № 4-1 . – С. 225-229.

В материалах международных и всероссийских конференций

34. **Черкасова Н.И.,** Гребенников В.С. Энергосбережение с учетом качества электроэнергии. Моделирование влияния искажающих воздействий/1-я Международная НПК «Технические науки: современные проблемы и перспективы развития» 10 декабря 2012 г. Йошкар-Ола, - С. 149-152.

35. **Черкасова Н.И.** Гребенников В.С., Татарникова А.Н. Обеспечение энергоэффективности в области потребления электроэнергии в сельском хозяйстве и ЖКХ/ Экономика, экология России в 21-м столетии. Матер. 15-й Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург. -2013. - С. 250-253.

36. **Черкасова Н.И.** Гребенников В.С. Улучшение качества электроэнергии. Выбор параметров фильтрокомпенсирующих устройств /«Инновации в науке»: Сборник статей. - Новосибирск: Изд. «СибАК», №24.- С. 81-87.

37. **Черкасова Н.И.** Плотность тока в проводах сельских линий 10 кВ/ IX Международная НПК «Теоретические и практические аспекты современной науки». г. Москва, 16 октября, 2013 г.- С. 31-36.

38. **Черкасова Н.И.** Повышение энергоэффективности распределительных сетей/Международная научная конференция “Science, Technology and Higher Education” Westwood, Canada, 2013, p. 86-89.

39. **Черкасова Н.И.** Функции желательности для оценки эффективности сельских электрических сетей 10 - 0,4 кВ /VI Международная научная конференция “European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches”, p. 86-89. Stuttgart, Germany, October 28-29, 2013.

40. **Черкасова Н.И.** Построение иерархических систем обобщенных критериев/ Развитие науки в XXI веке: международная конференция, Украина г. Донецк, 16 ноября 2013. - С. 14-18.

41. **Черкасова Н.И.** Анализ опасности и оценка риска распределительных электрических сетей//Международная научно-практическая конференция «Технические науки: теория, методология и практика», Москва, 17 июня, 2014.

42. **Черкасова Н.И.** О концепции стоимости жизни человека и принципах оценки ущерба от электротравматизма/ О.К. Никольский, Г.А. Гончаренко, Н.И. Черкасова/«Энерго - и ресурсосбережение – XXI век». Материалы XI международной научно-практической конференции 30 июня 2013 г. – г. Орёл: Госуниверситет – УНПК, 2013.

43. **Черкасова Н.И.** Повышение энергоэффективности системы электроснабжения сельских потребителей/«Энерго и ресурсосбережение – XXI век». Материалы XIV международной научно-практической конференции – г. Орёл: ОГУ им. Тургенева, 2016.- с. 158-161.

44. **Черкасова Н.И.** Применение ступени напряжения 20 кВ в распределительных сетях/В сборнике: Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции г. Рубцовск. 2016.

Свидетельства о регистрации программ ЭВМ

45. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617690 «Автоматизированный расчет критериев эффективности электрических сетей» Авторы: **Черкасова Н.И.** (RU), Ларина Н.А. (RU).

46. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20166125000 "Автоматизированный расчет надёжности и экономичности воздушных линий электропередач" » Авторы: **Черкасова Н.И.** (RU), Ларина Н.А. (RU).

Черкасова
Нина Ильинична
ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫМИ РИСКАМИ
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано к печати 03.05.2017. Формат 60х84/16.

Усл. печ. л. 2,00. Тираж 100 экз. Заказ 171624.

Отпечатано в ИТО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.