

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СЕВЕРНОГО ЗАУРАЛЬЯ»

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
УПРАВЛЕНИЯ АНТРОПОГЕННЫМИ РИСКАМИ
ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК
ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ
ПРЕДПРИЯТИЙ АПК**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Государственный аграрный университет Северного Зауралья»

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
УПРАВЛЕНИЯ АНТРОПОГЕННЫМИ РИСКАМИ
ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК
ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ
ПРЕДПРИЯТИЙ АПК**

Монография

Текстовое (символьное) электронное издание

Редакционно-издательский отдел ГАУ Северного Зауралья

Тюмень 2025

© О. К. Никольский, Д. О. Суринский,
Л. В. Куликова, Т. М. Халина,
В. В. Фараносов, Ю. Д. Шлионская, 2025
© ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2025

ISBN 978-5-98346-195-6

УДК 621.3:62-78:63
ББК 40.74:31.26

Рецензенты:

профессор, заведующий кафедрой «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет», г. Барнаул, доктор технических наук А. А. Багаев;
профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и энергосбережение», ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», г. Орел, доктор технических наук А. Н. Качанов;
доцент, директор Инженерно-технологического института, ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, г. Тюмень, кандидат технических наук Н. Н. Устинов

Методологические основы управления антропогенными рисками опасности электроустановок человеко-машинных систем предприятий АПК : монография / О. К. Никольский, Д. О. Суринский, Л. В. Куликова, Т. М. Халина, В. В. Фараносов, Ю. Д. Шлионская. – Тюмень : ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2025. – 110 с. – URL: <https://www.gausz.ru/nauka/setevye-izdaniya/2025/surinskiy.pdf>. – Текст : электронный.

Сведения об авторах:

Никольский О. К. – доктор технических наук, профессор, АлтГТУ имени И. И. Ползунова, г. Барнаул;
Суринский Д. О. – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, г. Тюмень;
Куликова Л. В. – доктор технических наук, профессор, АлтГТУ имени И. И. Ползунова, г. Барнаул;
Халина Т. М. – доктор технических наук, профессор, АлтГТУ имени И. И. Ползунова, г. Барнаул;
Фараносов В. В. – соискатель, АлтГТУ имени И. И. Ползунова, г. Барнаул;
Шлионская Ю. Д. – соискатель, АлтГТУ имени И. И. Ползунова, г. Барнаул

Монография является продолжением изданной в 2024 году монографии «Экспертная система диагностирования и оптимизации антропогенных рисков электроустановок в человеко-машинных системах» и содержит ряд новых вопросов, не рассмотренных ранее. В частности, вопросы, связанные с применением экспертных систем в задачах моделирования и оценки антропогенных рисков опасности предприятий АПК.

Монография предназначена для научных работников, преподавателей, магистрантов, аспирантов электротехнологических направлений АПК.

Текстовое (символьное) электронное издание

© О. К. Никольский, Д. О. Суринский, Л. В. Куликова, Т. М. Халина,
В. В. Фараносов, Ю. Д. Шлионская, 2025

© ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Основы системного анализа безопасности электроустановок	6
2. Концепция антропогенного риска и методы выбора его приемлемого уровня.....	14
3. Показатели эффективности функционирования системы антропогенной безопасности электроустановок.....	25
4. Методы анализа антропогенного риска электроустановок	30
5. Методы прогнозирования антропогенного риска и оценка остаточного ресурса	35
6. Методы оценки и управления антропогенными рисками опасности электроустановок.....	42
7. Анализ ущербов от антропогенных рисков в электроустановках ..	56
8. Алгоритм оценки и анализа интегрального риска электроустановок объекта.....	67
9. Методы моделирования опасных антропогенных ситуаций в электроустановках	79
10. Анализ методов представления времени в задачах моделирования и оценки техногенных рисков	97
Заключение.....	104
Список литературы.....	105

Введение

В настоящее время анализ и управление техногенными рисками опасности электроустановок практически сформировала в самостоятельное научное направление которое находит применение в аграрной отрасли и коммунальной электроэнергетике. Диагностирование и контроль техногенной безопасности производственных объектов связан с решением комплекса научных и практических задач, направленных на прогнозирование, управление и оптимизации рисков на протяжении всего жизненного цикла объекта с учетом случайных и неопределенных факторов, влияющих на угрозу возникновения аварии систем электроснабжения, электротравматизма и пожаров, вызванных действием электрического тока.

Одной из основных причин существования негативной технической обстановки является недостаточная проработка проблемы безопасности электроустановок в рамках рассмотрения сложной неструктурируемой человеко-машинной системы «Ч-Э-С». Так, в частности, отсутствует концепция изучения сущности и содержания интегрального риска, не обоснованы критерии и показатели идентификации техногенных опасностей электроустановок в условиях исходных и текущих данных, отсутствуют модели и алгоритмы, позволяющие проводить оптимизацию риска на основе многокритериального анализа, не решена важная инженерная задача проектирования и внедрения эффективных и экономически целесообразных систем безопасности электроустановок зданий и сооружений.

Одним из основных факторов обеспечения надежности и безопасности человеко-машинной системы «Ч-Э-С» является диагностирование, позволяющее не только своевременно обнаруживать и локализовать дефекты технологического электрооборудования в процессе эксплуатации, возникающие сбои и отказы, связанные с человеческим фактором и негативной средой, но и возможность встраивать интеллектуальные инструменты в систему технического обслуживания и ремонта, что позволяет своевременно прогнозировать организационно-технические мероприятия, увеличить остаточный ресурс, уменьшить эксплуатационные затраты для

обеспечения заданных критериев надежности и безопасности электроустановок.

Проблемой повышения надежности и безопасности в энергетической отрасли (в том числе сельской электроэнергетики) посвящено большое количество исследований, проводимых как в нашей стране, так и за рубежом.

Проведенные исследования в основном относятся к стационарным электроустановкам, находящимся в зданиях и вне их, в том числе на открытых площадках подстанций. В то же время актуальным является обеспечение безопасности электрифицированных электроустановок, характеризуемых рядом специфических особенностей, к числу которых следует отнести мобильность и автономность электроснабжения. Их работа зачастую проводится вне помещений и поэтому они подвержены негативным воздействиям внешней среды. Опыт эксплуатации показывает низкую эффективность применения традиционных мер (зануления, защитного заземления с использованием предохранителей и автоматических выключателей) для защиты нестационарных электроустановок.

Социальная значимость проблемы техногенной безопасности особенно возрастает в условиях создания и развития частного предпринимательства и сферы обслуживания, в которой принимает участие практически все население страны. Изложенное выдвигает требования решения ряда прикладных задач, направленных на разработку новой системы безопасности электроустановок (СБЭ), в том числе, нестационарных, которая должна иметь высокую электрозашитную эффективность и надежность, обоснованную структуру и необходимое нормативно-техническое обеспечение. Причем отсутствие необходимых для этой цели материальных ресурсов может быть преодолено путем создания стратегии оптимизации СБЭ, в основе которой лежит минимизация затрат при допустимом (нормируемом) риске опасности электроустановки.

1. Основы системного анализа безопасности электроустановок

Введем следующие определения в рамках теории системного подхода. Под электротравматизмом условимся понимать некоторое множество электротравм (отнесенное к одному году), обусловленных причинно-следственными связями между элементами системы «человек - электроустановка - среда» (Ч-Э-С).

Система безопасности электроустановок (СБЭ) - совокупность взаимосвязанных технических средств и организационных мероприятий и соответствующих им нормативно-правовых актов, направленных на предупреждение несчастных случаев и снижение их последствий.

В соответствии с принятыми определениями на рисунке 1 приведена структура системы (Ч-Э-С). При формировании системы обеспечения электробезопасности будем руководствоваться не только учетом объективно действующих факторов, обуславливающих потенциальную опасность, но и оценкой реальных возможностей общества. Здесь не следует интерпретировать «безопасность» в общепринятом смысле, предполагающем отсутствие каких-либо опасностей. Поэтому условимся считать, что основной целью функционирования рассматриваемой системы является получение результата, направленного на минимизацию ущерба от электротравматизма, вызванного в том числе и аварийным состоянием электроустановки. Причем цель СБЭ здесь должна быть подчинена решению главной стратегической задачи - обеспечению жизнедеятельности людей, включая качество жизни человека.

Рассмотрим компоненты системы (Ч-Э-С).

Человек. В этой системе человек выступает в роли объекта защиты или оператора, выполняющего определенные технологические функции в электроустановке.

Как объект защиты человек описывается следующими признаками: полом, возрастом, медицинскими противопоказаниями, психофизиологическим состоянием, электрическими параметрами тела человека (в первую очередь, сопротивлением Z_h), видами воздействия электрического тока (электрический удар, электротравмы различной степени тяжести), образованием, профессией, стажем

работы, квалификационной группой по ТБ (для электротехнического персонала). [1]

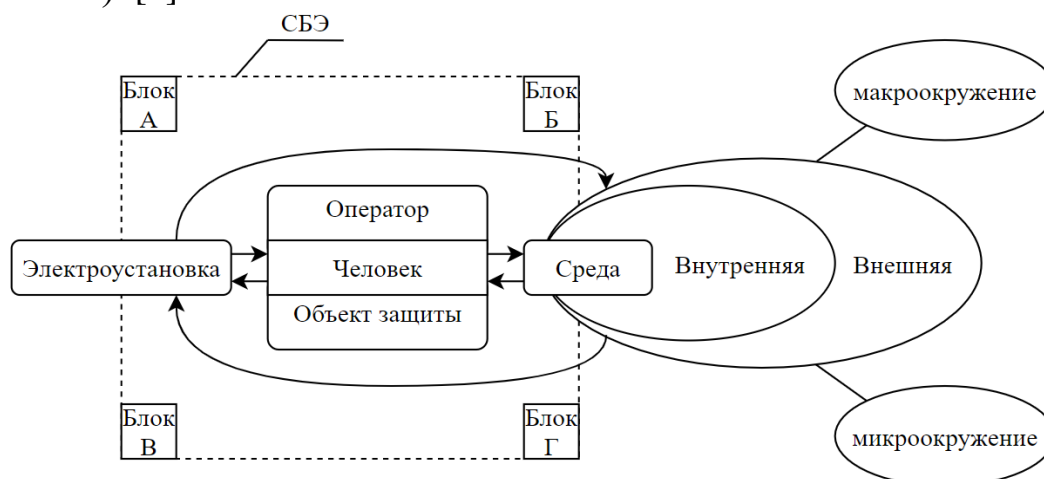


Рисунок 1 – Структурное описание системы (С-Ч-С)

При рассмотрении человека в системе (Ч-Э-С) как оператора, выполняющего определенные виды работы или участвующего в технологических операциях, на степень безопасности существенно влияет так называемый человеческий фактор. Оператор, обслуживающий электроустановку, может допускать неправильные и ошибочные действия. Такие ошибочные действия, как правило, сопряженные с нарушениями требований техники безопасности, несоблюдением инструкции по использованию бытовых электроприборов, инструмента и т.д., зачастую приводят к аварии или поломке электрооборудования и получению электропоражения. В этой связи возникает необходимость совершенствования профессиональных знаний и навыков персонала, как одного из компонентов рассматриваемой системы при выполнении тех или иных технологических процессов, обеспечивая при этом условия безопасности, недопущения аварийности, травматизма и перерыва электроснабжения. Доля нарушений от неправильных действий оператора, как показывает опыт, значительно превалирует над другими факторами опасности и составляет: на автомобильном транспорте - 60 %, в гражданской авиации - почти 75 %. Одной из основных причин здесь следует считать несоответствие между требованиями современной техники и психофизиологическими возможностями человека как оператора. Поэтому общепринятое определение

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

профессиональной пригодности оператора (в том числе и эксплуатирующего электроустановку) следует рассматривать как соответствие свойств личности требованиям профессии, включающим ее отношение к работе, профессиональные способности и наличие нужных для данной деятельности знаний, умений и навыков. Указанное положение в полной мере относится к производственной деятельности сельскохозяйственных предприятий, на которых эксплуатация, ремонт и профилактика электроустановок профессионально осуществляется электротехническим персоналом. Применительно к условиям быта, как уже отмечалось, обслуживание нестационарных электроустановок в целом приходится на население. Поэтому сокращение числа аварий и травм, вызванных человеческим фактором, может быть достигнуто за счет применения специальных высокоэффективных коммутационных электрических аппаратов, обесточивающих электросеть в случае ошибочных действий оператора. Уменьшение степени тяжести ошибок человека и выхода из строя электрооборудования обеспечивается в настоящее время применением всевозможных блокировок органов управления, включая защитное отключение.

Электроустановку будем рассматривать как непосредственный источник поражения. Электроустановка характеризуется следующими признаками: формой собственности, видом и назначением, режимом нейтрали, номинальным напряжением, родом и частотой тока, способом электропитания (сеть, автономный источник), степенью мобильности (стационарные, передвижные, переносные и ручные), режимом работы (нормальный, аварийный), соответствием конструкции, монтажа и эксплуатации, а также Правилам устройства электроустановок и требованиям техники безопасности.

Связи «человек-электроустановка» могут быть определены следующими признаками: условием работы (под напряжением и отключением электросети), характером возможного попадания человека в цепь тока, видом работы (монтаж, наладка, испытание, ремонт и эксплуатация электроустановки), а также видом цепи тока при попадании человека под напряжение, продолжительностью воздействия электрического тока, величиной напряжений прикосновения и шага. При этом будем рассматривать следующие основные виды опасностей. [2]

1. Опасность электроустановки, вызванная попаданием человека в цепь электрического тока:

- при двухфазных прикосновениях;
- при однофазных прикосновениях, т.е. прикосновении человека, имеющего гальваническую связь с землей и одной из фаз (прикосновение к токоведущим частям электроустановки, находящихся под напряжением; прикосновение к токопроводящим частям оборудования, оказавшимся под напряжением в результате либо повреждения изоляции, либо заноса электрического потенциала по цепям зануления с других объектов);
- при попадании под шаговое напряжение.

Параметрами, определяющими условия электробезопасности, здесь являются: $U_{л}$ и $U_{ф}$ - линейное и фазное напряжения сети; I_{h} - ток, проходящий через тело человека; Z_{h} - сопротивление тела человека; $R_{пр}$ - сопротивление проводов сети относительно земли; $R_{р}$ - сопротивление растеканию тока; $U_{пр}$ и $U_{ш}$ - напряжения прикосновения и шага.

Основными факторами, влияющими на тяжесть и исход электротравмы, следует считать величину тока, проходящего через тело человека, и длительность действия этого тока.

2. Опасные действия человека возможны при небезопасных работах, а также при выполнении им работы на небезопасных рабочих местах. При обслуживании электроустановок опасные действия связаны с монтажом, демонтажем, включениями, а также профилактикой, осмотром и ремонтом. При эксплуатации электрифицированных СММ опасные действия возможны при работе с ручным инструментом, с электроприводом и т.д., а также при выполнении таких работ, в которых электроустановки вообще не используются, но свои действия человек осуществляет вблизи работающих электроустановок, например, опасные работы на крыше дома, скирдование сена и т.д., если они выполняются, например, в зоне действия ЛЭП, или в зоне растекания тока в земле при обрыве провода сети.

Средства защиты от поражения электрическим током и электрической дугой целесообразно подразделять на средства, предупреждающие прикосновения человека к опасным элементам электроустановок, и средства, обеспечивающие защиту при

прикосновениях, как к токоведущим, так и токопроводящим частям, оказавшимся под напряжением. Средства защиты отнесем к элементам электроустановки.

Отметим, что опасность реализуется, если действия человека сопряжены с возможностью протекания через его тело тока, который с учетом времени его действия превышает допустимое для человека значение. Из этого следует, что можно выделить три группы электротехнических мер, обеспечивающих:

- предупреждение возможности протекания тока через тело человека;
- уменьшение значения возможного тока, протекающего через тело человека, до значения ниже предельно допустимого (пассивная мера защиты);
- уменьшение времени протекания тока через человека, если значение этого тока выше предельно допустимого (активная мера защиты).

При построении СБЭ следует дополнительно соблюдать основное правило устройства электроустановок: токоведущие части электроустановки не должны быть доступны для случайного прикосновения к ним, а доступные прикосновению открытые и сторонние проводящие части не должны находиться под определенным напряжением, представляющим опасность поражения электрическим током, как в нормальном режиме работы электроустановки, так и при повреждении изоляции.

Среда - множество объектов, не входящих в структуру СБЭ, свойства которых оказывают определенное позитивное или негативное воздействие (в т.ч. опосредованное). Выделим здесь внутреннюю и внешнюю среду.

Внутренняя (рабочая среда) - область пространства (включая предметы труда), в пределах которой совершаются определенные виды работы в электроустановках. Сюда следует отнести фермерские и личные подсобные хозяйства, жилые дома, хозпостройки и т.д. При этом необходимо учитывать отрицательные атмосферные воздействия (при работе с электроустановками вне помещений) и негативное влияние параметров микроклимата помещений на изоляцию токоведущих частей электрооборудования.

Внешней (для конкретной системы «Ч-Э-С») средой является все то, что непосредственно не входит в нее, но может влиять на процесс функционирования системы, улучшая (или ухудшая) качество системы электробезопасности.

Рассмотрим внешнюю среду, состоящую из двух «оболочек» - микро- и макроокружения. Состояние внешней среды может описываться тремя характеристиками (сценариями): степенью благоприятствования или противодействия деятельности предприятия (малого бизнеса, фермерства, АО и др.) и степенью предсказуемости состояния окружения. [3]

В микроокружение введем физические и юридические лица, которые являются партнерами (в широком смысле), связанные производственными отношениями (поставщики, продавцы, конкуренты, предприятия по переработке продукции, электроснабжающие организации, кредитные учреждения, служба охраны труда, контрольные и надзорные органы, а также средства массовой информации, которые могут оказывать опосредованное воздействие на регулирование производственных отношений в сельском хозяйстве).

Макроокружение включает органы власти различного уровня, определяющие политическую, экономическую и социальную обстановку в целом в стране и в регионе, научно-технический прогресс, системы правового регулирования рыночных отношений, включая налоговое и таможенное законодательство, антимонопольное регулирование, а также система регулирования тарифов на электрическую и тепловую энергии.

Предсказуемое состояние внешнего окружения определяет достаточно точно вероятности тех или иных событий и их характеристики. В этом случае лица, участвующие в производстве и продаже сельскохозяйственной продукции, могут выстраивать и прогнозировать свою деятельность на ближайшие 3 - 5 лет.

Неопределенное окружение возникает тогда, когда возможность какого-либо ожидаемого события не известна, но известен закон распределения вероятностей. Если же неясен сам закон распределения вероятностей, то конечные события и их последствия остаются непредсказуемыми.

Отметим, что затронутые здесь вопросы в большей мере имеют отношение к экономической деятельности сельскохозяйственной отрасли и к отдельным производителям сельхозпродукции. Однако стабильность в целом экономики государства, прозрачность и ясность ее действующей законодательной базы и инвестиционной деятельности в области АПК создают необходимые предпосылки и перспективы развития частного аграрного сектора и личных подсобных хозяйств на селе, которые в настоящее время производят уже 54 % всей сельскохозяйственной продукции, вырабатываемой в России.

Решение проблемы предупреждения электротравматизма и снижение его последствий должно вестись в направлении изучения свойств и взаимосвязи всех компонентов системы (Ч-Э-С). Как следует из определения СБЭ, ее структура должна содержать в себе, по меньшей мере, четыре основных блока:

БЛОК А - включает нормативные правовые акты, задающие требования безопасности электроустановок;

БЛОК Б - содержит комплекс технических мероприятий и электрозащитных средств;

БЛОК В - представляет собой систему организационных мероприятий по охране труда, необходимых в процессе производственной или иной деятельности человека в электроустановках;

БЛОК Г - предназначен для сбора, обработки и анализа информации, циркулирующей в рамках рассматриваемой системы (Ч-Э-С), с последующим принятием тех или иных решений. Эти решения выражаются в виде воздействия оператора на основные блоки А, Б и В. [4]

Свойства компонентов системы (Ч-Э-С), влияющие на электробезопасность, учитываются определенной совокупностью параметров (факторов), качественно или количественно характеризующих компоненты и элементы рассматриваемой системы. Известно, что возникновение электротравмы есть событие случайное, зависит от множества случайных элементарных событий и поэтому связано с большой степенью неопределенности. В этом случае анализ причинно-следственных связей должен опираться на теорию вероятностей и математическую статистику, включая этапы: определение потенциальной опасности электроустановки и

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

неправильного ошибочного действия оператора, разработку логико-математических процедур формирования электротравмы, обоснование комплекса электрозащитных мер и выбора из них наиболее предпочтительного варианта. В основе построения системы электробезопасности должен лежать принцип, базирующийся как на признании существующих опасностей как объективной реальности, так и на понимании в обществе необходимости выделения соответствующих финансовых средств и ресурсов, направленных на предупреждение этих опасностей. Поэтому одним из главных условий создания эффективной СБЭ в агропромышленной сфере должно быть не нивелирование опасности («затыкание дыр») путем выделения по остаточному принципу каких-либо финансовых средств на эти цели, а решение кардинальной проблемы - обоснование объема инвестиции, как для отдельных регионов, так и для агропромышленной отрасли в целом, необходимого и достаточного для получения устойчивого и приемлемого уровня безопасности электроустановок. Отметим, однако, что, кроме потребностей в ресурсах, реализация требований по обеспечению безопасности еще не является гарантией повышения производительности труда, как это декларировалось у нас в прошлом веке. В этих условиях возникает необходимость в установлении приоритетов. Отдавая дань безусловной гарантии безопасности отметим, что главенствующим здесь была и остается эффективность производственной деятельности человека как основа его существования. В этой трактовке обеспечение электробезопасности является вторичным и его следует рассматривать как некоторую вынужденную меру. Возникающие при этом внутренние противоречия и сомнения о невозможности реализации требований к обеспечению безопасности техногенной сферы могут быть устранены путем введения количественных показателей эффективности функционирования системы (Ч-Э-С) и обоснования необходимого уровня риска.

2. Концепция антропогенного риска и методы выбора его приемлемого уровня

Известно, что уровень техногенной безопасности отражает научно-технические и экономические возможности государства, имеет стохастическую природу и определяется рядом случайных факторов.

Применительно к рассмотрению поставленной задачи уровень электробезопасности будем характеризовать:

- вероятностью возникновения травмоопасной ситуации (ТС) - попадание человека под напряжение;

- последствием появления ТС, т.е. исходом, приводящим человека к определенному виду травмы, экономические потери от которой могут быть выражены в виде материального ущерба в денежном эквиваленте.

Для изучения опасности и негативных последствий на окружающую среду и здоровье человека в последние годы сформировалось новое междисциплинарное направление - анализ и оценка риска. Риск при этом рассматривается как некоторая количественная характеристика степени опасности, обусловленная деятельностью человека. Анализируя различные определения рисков, отметим, что они объясняются через ряд других понятий, базовыми из которых являются опасность и связанный с ней ущерб. Риск, являясь наиболее емким интегрирующим понятием, фактически служит своего рода объективной мерой, осознаваемой человеком опасности его жизни и здоровью. С этих позиций опасность, например, электроустановки может рассматриваться как состояние, внутренне ей присущее. Такое состояние может проявляться в виде вредных или поражающих воздействий в форме прямого или косвенного ущерба для человека и окружающей среды в процессе штатной эксплуатации объекта или его аварии.

Целесообразность изучения проблемы оценки риска и управление последним вытекает из признания большинством специалистов, с одной стороны, факта полной неустранимости риска антропогенного происхождения, а с другой - возможности его коррекции. Поскольку риск из современной жизни человека принципиально неустраним, а, следовательно, не может быть сведен к нулю, многие страны, формируя политику в области безопасности,

опираются на концепцию приемлемого риска. В основе этой концепции содержится количественная оценка технологического риска, устанавливающая предельно допустимые его значения для населения и окружающей среды (табл. 1). Анализ практики управления риском в различных странах свидетельствует о том, что для целей нормирования применяются различные количественные показатели риска. Наиболее жесткие нормативные уровни установлены в Нидерландах - в стране с самым низким уровнем травматизма. Приемлемый уровень риска для этой страны законодательно закреплен значением менее 1×10^{-8} .

Таблица 1 – Сравнение нормативных уровней индивидуального риска, предлагаемых для использования в практической деятельности в различных странах

Страна	Предельно допустимый уровень индивидуального риска	Пренебрежительно малый уровень индивидуального риска
Нидерланды	1×10^{-6}	1×10^{-8}
Китай	1×10^{-5}	1×10^{-7}
Россия	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-6}

В России до настоящего времени законодательно не были закреплены нормативные значения, опираясь на которые можно было бы осуществлять эффективную политику в области управления риском с применением различных механизмов регулирования и контроля. Вместе с тем расчеты специалистов показывают, что предельный нормативный уровень годового индивидуального риска должен находиться в диапазоне $1 \times 10^{-4} \dots 1 \times 10^{-5}$. Отметим, что введение норматива на величину приемлемого риска допускает вероятность возникновения ТС, осознавая при этом, что появление ее оправдано экономическими и социальными возможностями общества (рисунок 2). [5]

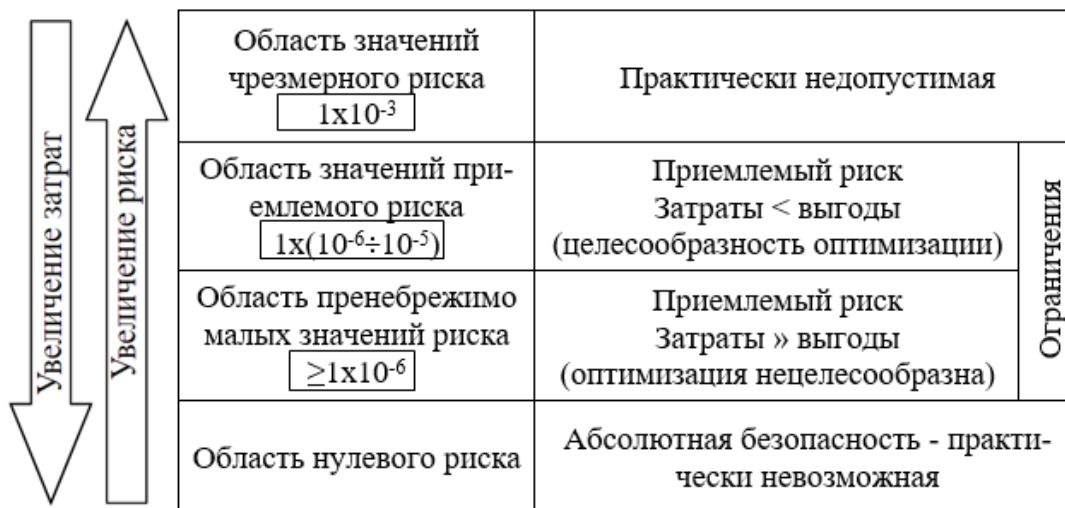


Рисунок 2 – Области уровней риска

Для территории России фоновый уровень смертности от неестественных причин близок к значению 1×10^{-4} , что на 2 порядка выше приемлемого уровня, установленного в странах Евросоюза. В то же время верхняя граница уровня гибели населения вследствие техногенных чрезвычайных ситуаций (ЧС) составляет порядка 1×10^{-5} - 5×10^{-6} . Такая существенная разница показателей верхнего и нижнего уровней может быть объяснима тем, что в нашей стране в настоящее время уже реализуется государственная политика по борьбе с техногенными катастрофами и пожарами. Достаточно отметить, что в этой сфере принято более 600 нормативных правовых актов федерального уровня и более 2500 актов субъектов Российской Федерации.

В частности, федеральным законом по пожарной безопасности в качестве приемлемого уровня как для персонала, так и для населения предусмотрено значение 1×10^{-6} . Вместе с тем становится необходимым закрепление на законодательном уровне значения индивидуального приемлемого риска от электротравмы.

Как уже отмечалось, для количественной оценки степени опасности человека, связанной с электротравмой, используется не только частота ее появления, но и тяжесть последствий для индивидуума и общества. Таким образом, условимся рассматривать риск R в виде произведения вероятности электротравмоопасной ситуации P и ожидаемого ущерба U в результате этого события, т.е.

$$R = P \times Y \text{ или } \sum_i^n p_i y_i, \quad (1)$$

если может иметь место n опасных событий i с различными вероятностями p_i и соответствующим им ущербом y_i в течение 1 года.

В настоящее время используются два подхода для математического описания риска. В основе первого лежит аналитическое описание риска в виде следующего интеграла:

$$R = \int F(Y)p(Y)dy, \quad (2)$$

где $F(Y)$ - весовая функция потерь, с помощью которой последствия различной природы приводятся к единой (например, стоимостной) оценке ущерба;

$p(Y)$ - плотность распределения случайных величин Y (ущерба).

В такой формулировке риск, являющийся количественной мерой опасности, фактически определяется как математическое ожидание ущерба или потерь. Однако, учитывая, что математическое ожидание случайной величины - величина не случайная, а детерминированная, выражение (2) может иметь существенную погрешность для определения риска отдельных последствий.

Второй подход, реализующий выражение (1), носит вероятностно-детерминистический характер. В этом случае процедура определения риска сводится к выполнению двух последовательных этапов: определение вероятности электротравматических ситуаций p_i и расчет ущерба y_i при соответствующих событиях.

Тогда определение годового риска $R(t)$ можно рассматривать в виде суммы

$$R(t) = Y_m(t) + Y_{чел}(t), \quad (3)$$

где $Y_m(t)$ - суммарный ежегодный материальный ущерб (руб.), вызванный авариями электроустановок, перерывами электро-снабжения, недоотпуском товарной продукции и т.д.;

$Y_{чел}(t)$ - суммарный ежегодный ущерб (руб.), обусловленный потерей здоровья или гибелью человека в результате электротравмы при возникновении аварии электроустановки или в результате штатного ее функционирования.

Как уже отмечалось выше, электротравма человека обычно возникает или при непосредственном прикосновении токоведущих

элементов, находящихся под напряжением, или в результате пробоя изоляции электрооборудования, или заноса электрического потенциала по сети зануления с других объектов. Применительно к нестационарным электроустановкам, обслуживающим население, величина $Y_m(t)$ достаточно мала. Тогда, пренебрегая $Y_m(t)$, получим

$$Y_{\text{чел}} = \sum_{i=1, j=1}^{n, m} N_{ij}(t) Y_{ij}(t), \quad (4)$$

где $N_{ij}(t)$ - вероятность (частота) возникновения j -го вида поражения человека от i -го поражающего фактора (1/год);

Y_{ij} - величина ущербов, обусловленных j -м видом поражения человека от i -го фактора (руб.).

Отметим, что пренебрежение величины $Y_m(t)$ в (3) оправдано, так как более 90 % общего ущерба в угольной и химической промышленности, оцениваемого в экономических показателях, относится к производственному травматизму. Поэтому при обосновании экономических показателей эффективности системы электробезопасности будем принимать во внимание только экономическую оценку риска жизни человека как риска, связанного с аварийным состоянием электроустановки или обусловленного ошибочным действием оператора, например, выданным случайным попаданием под напряжение. [6]

Введем показатель $U_{\text{чел}}$, отражающий материальный ущерб при попадании человека в цепь электрического тока. Этот показатель в зависимости от поставленной задачи может быть выражен в относительных единицах или денежном эквиваленте.

Рассмотрим три основных последствия возникновения травмоопасной ситуации (ТС):

а) легкая степень электротравмы, вызвавшая временную потерю трудоспособности (U^{III});

б) средняя степень электротравмы - полная потеря трудоспособности - инвалидизация (U^{II});

в) тяжелая степень электротравмы - летальный исход (U^{I}).

Рассмотрим показатели вероятности P и ущербов U в виде некоторых векторов \bar{P} и \bar{U} и возьмем их векторное произведение, которое, согласно (1), представляет показатель риска R , т.е. $\bar{R} = [\bar{P}_x \bar{U}]$. Учитывая, что \bar{P} и \bar{U} представляются безразмерными

величинами, вектор R также будет величиной безразмерной, имеющей модуль $\{P|Y|\sin(P, Y)\}$, направленный перпендикулярно плоскости, в которой расположены векторы \bar{P} и \bar{Y} (рисунок 3).

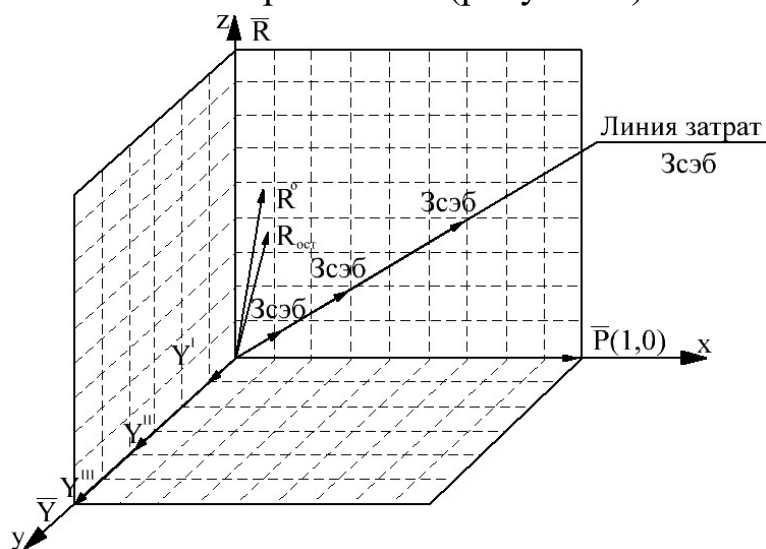


Рисунок 3 - Графическая интерпретация интегральной оценки риска

Вектор \bar{P} изменяется в пределах от 0 до 1,0. Вектор \bar{Y} изменяется дискретно и принимает три значения материальных ущербов, вызванных легкой, средней и тяжелой степенью электротравмы. В соответствии с апостериорной оценкой, приняв общее количество регистрируемых электротравм в течение 1 года за единицу, можно оценить долю каждого вида электротравмы: легкая степень $\approx 0,56$, средняя $\approx 0,28$, тяжелая $\approx 0,16$.

Тогда на оси y модуль Y соответствует числу несчастных случаев с летальным исходом, а модули $|Y''|$ и $|Y'''|$ - количеству электротравм соответственно средней и легкой степени тяжести. Таким образом, ось y отражает материальные ущербы, вызванные электротравматизмом людей за 1 год.

Примем ущерб Y со знаком минус, а затраты на создание системы электробезопасности со знаком плюс. Тогда линия затрат Z может быть представлена в виде продолжения оси y в противоположном от начала координат направлении.

Материальный ущерб, обусловленный тяжестью электротравмы, и затраты на создание системы обеспечения безопасности можно проиллюстрировать с помощью векторной матрицы, изображенной на

рисунке 3. На данном рисунке в координатах x , y и z приведены соответственно векторы \bar{P} , \bar{U} и \bar{R} , а также первоначальное значение индивидуального риска R^0 , полученного до использования затрат на внедрение системы обеспечения электробезопасности $Z_{СЭБ}$. При введении показателя $Z_{СЭБ}$ можно получить $R_{ост}$ - остаточное значение риска, обусловленное не устраненной долей электротравматизма. При определенных сочетаниях величин U , P и $Z_{СЭБ}$ В процессе оптимизации можно получить остаточное значение риска $R_{ост}$, рассматриваемое как приемлемый индивидуальный риск. Изложенный подход для определения области значений приемлемых рисков будет положен в основу моделирования и оптимизации системы обеспечения электробезопасности (главы III и VI).

Оценка и прогнозирование индивидуального риска электротравмы связана с решением таких задач, как:

- выявление «слабых мест», т.е. наиболее значимых в формировании недопустимого риска, вызванного дефектами конструкции и эксплуатации электроустановки, ошибки оператора и т.д.;

- выбор предположительных (по критерию «затраты- выгоды») вариантов снижения индивидуального рисков путем проведения оптимизации системы электробезопасности;

- оценка соответствия объекта в целом требованиям электрической, пожарной и экологической безопасности, охраны труда;

- принятие решения о необходимости дополнительных мер по обеспечению безопасности эксплуатации электроустановок.

Предполагается, что решение каждой из этих задач можно осуществить следующими способами:

- идентифицировать источники и признаки проявления техногенного риска, определить параметры предпосылок к происшествиям, сценарии их развития и проявления с помощью построения диаграммы причинно-следственных связей (дерева событий и исходов) и достоверных статистических данных относительно аварийности и травматизма на исследуемом и аналогичных объектах;

- оценить достаточность мероприятий, уже внедренных и предлагаемых для снижения техногенного риска методами системного анализа указанных выше «деревьев».

Рассмотренная концепция позволяет разработать обобщенную методику оценки индивидуального риска. Однако одним из проблемных вопросов остается недостаточность статистических данных. [7] В этом случае расчет показателей, характеризующих вероятность события и меру последствий этого события, можно проверить методом экспертных оценок с использованием универсальных шкал базовых балльных, описательных и численных оценок. В таблице 2 приведена предложенная модификация шкалы в упрощенном варианте.

В случае возникновения летального исхода при электротравме возникает вопрос о стоимости причиненного ущерба.

Причем этот ущерб опосредственно связан с материальной оценкой жизни человека, которая на протяжении многих лет вызывала и вызывает острые дискуссии.

Таблица 2 - Упрощенная шкала базовых оценок параметров индивидуального риска

Наименование параметра и его лингвистическая оценка		Балл	Численная характеристика
Вероятность события	Последствия (мера тяжести)		
Совершенно невозможно	Очень низкая	5	0,0
Практически невозможно	Низкая		0,2
Допустимо, но маловероятно	Средняя	4	0,4
Неопределенно возможно	Выше среднего	3	0,6
Практически возможно	Высокая	2	0,8
Абсолютно достоверно	Очень высокая		1,0

Правомерна ли вообще такая постановка вопроса? Можно ли экономически оценивать жизнь человека? В контексте изложенного могут возникать противоречивые суждения. С одной стороны, нелепо оценивать жизнь конкретного человека (индивидуума) в денежном эквиваленте. Отсюда следует, что ценность собственной жизни и жизни близких людей выше любой сколь угодно большой суммы. В гуманном обществе бесконечной ценностью представляется не только

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

собственная жизнь и жизнь близких, но и жизнь окружающих, т.е. каждого отдельного человека. На этом основании существовавшее в советское время мнение о расчете стоимости человеческой жизни признавалось циничным и неприемлемым по морально-этическим соображениям. С другой стороны, в комплексе жизненных благ человека безопасность, как уже отмечалось выше, занимает видное, но не определяющее место. Ее значимость в жизни человека соизмерима с материальными и духовными ценностями, зачастую не удлиняющими жизнь, но повышающими ее качество. Человек мирится с пагубными привычками, вредными и опасными производствами, экстремальными видами спорта, даже с возможностью преждевременной смерти, полагая, что существующий риск покрывается получаемыми при этом преимуществами, такими, как дополнительные материальные блага, комфорт, скорость, захватывающие ощущения и др. Само существование профессий, связанных с высокой вредностью и опасностью, говорит о том, что дополнительные блага (высокая заработная плата, социальные льготы, пенсии и т.д.) могут перекрывать возможные отрицательные последствия для жизни и здоровья человека на вредных и опасных производствах. Возникшее противоречие, на наш взгляд, устраняется, если будут разграничены два понятия: жизнь индивидуума (конкретного человека) и жизнь среднестатистического человека. Если конкретному человеку грозит опасность - ценность его жизни не должна сводиться к некой денежной сумме. Вопрос не стоит: нужно или не нужно его спасать - какой бы суммой не выражалась стоимость его спасения, ибо не существует таких денежных средств, которыми можно было бы выразить ценность его жизни. Поэтому, говоря о статистической жизни, не имеется в виду жизнь конкретного человека. При допустимом (приемлемом) риске стоимость статистической жизни является конечной величиной, эквивалентом которой может рассматриваться недовклад в ВВП результатов труда погибшего. Поэтому такую стоимость можно выразить в денежном эквиваленте. В то же время следует понимать, что далеко не все затраты, направленные на снижение риска, экономически возможны и оправданы. Нельзя требовать снижения риска любыми средствами, поскольку это нереально, как и невозможно добиться создания абсолютной системы безопасности с нулевым риском. Нам

представляется, что должен существовать некоторый предел финансовых средств и материальных ресурсов, выше которых их расходование становится нецелесообразно, а в ряде случаев и невозможно при определенном уровне экономического развития общества.

В настоящее время в качестве количественной оценки материального ущерба от потери жизни используется термин «цена риска», являющийся денежным эквивалентом стоимости единицы риска α . В отличие от натурального показателя риска (например, частота смертности людей) показатель α относится к категории монетарных показателей, характеризующихся экономическими единицами измерения. Поэтому его более удобно использовать при проведении экономической оптимизации. Цену риска α нельзя отождествлять с ценой жизни человека (стоимость среднестатистической жизни) или ущербом, связанным со смертью конкретного человека. Экономический смысл показателя α отражает готовность общества платить за то, чтобы избежать этого риска либо его компенсировать в случае добровольного согласия людей воспринимать опасность. Социально-экономический ущерб от преждевременной смерти людей в регионе или отрасли может быть определен как произведение ожидаемого количества погибших на среднестатистическую оценку стоимости статистической жизни (ССЖ). Наиболее объективные оценки ССЖ, полученные на основе социально-экономических исследований и анализа рынка труда для развитых стран, находятся в диапазоне от 3 до 7 млн. дол. США.

Сложившееся в последние годы положение с огромными затратами на обеспечение безопасности, которое имеет место в экономике высокоразвитых стран (США, Канада и др.), вызывает серьезное беспокойство, ибо действующая система затрат на обеспечение безопасности может стать серьезным препятствием социально-экономического развития этих стран. Евросоюз, в частности, планирует в ближайшие годы разработать унифицированную «политику безопасности», сводящуюся к уменьшению риска в промышленных регионах, основанную на принципе оптимального выделения средств для его снижения. [8]

Проблема установления нормативных рисков для нашей страны сегодня представляется весьма важной. Иллюстрируется эта проблема

на примере опасности гибели при пожаре, индивидуальный риск гибели которого составляет 130×10^{-6} , что является неприемлемым по международным нормативам (1×10^{-6}). Отметим при этом, что индивидуальный риск электротравмы с остальным исходом, по нашим оценкам, для сельскохозяйственной отрасли составляет порядка $30 \dots 50 \times 10^{-6}$, что также значительно превышает международную норму. Снижение данного риска даже на порядок требует огромных затрат. Если принять для предотвращения смертельного случая при пожаре минимальную экспертную оценку 50 тыс. дол. США, то снижение индивидуального риска на порядок означает, что число погибших должно уменьшиться с 7500 до 750 человек в год. Следовательно, затраты на снижение риска до значения 7×10^{-4} (неприемлемого) составят 337,5 млн. дол. США, что в настоящее время является также невозможным и по экономическим соображениям.

Согласно экспертным оценкам ПДУ индивидуального риска для России с учетом ее социально-экономического развития должен находиться в диапазоне $1 \times (10^{-5} \div 10^{-6})$ в год. Что касается экономического анализа для решения задач оптимизации, необходимо установить конкретные значения цены риска. Учитывая более низкие среднедушевые доходы населения России по сравнению с экономически благополучными странами, для проведения оценок социально-экономического ущерба от электротравмы с летальным исходом представляется целесообразным рекомендовать к внедрению диапазон значений цены риска $\alpha = 50 - 150$ тыс. дол. США с точечной оценкой порядка $\alpha = 100$ тыс. дол. США. Отметим, что рекомендуемые к использованию среднее и граничные значения цены риска нужно рассматривать в рамках сложившихся в настоящее время экономических условий в стране. По мере стабилизации экономического положения в России цена риска может быть пересмотрена в сторону увеличения, что необходимо для того, чтобы экономические механизмы управления риском работали более эффективно.

3. Показатели эффективности функционирования системы антропогенной безопасности электроустановок

При решении задач моделирования и оптимизации СБЭ возникает необходимость оценки эффективности комплекса организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение электробезопасности. Причем приоритет здесь должен быть отдан количественным, а не качественным показателям, поскольку предназначением качественного анализа является изучение общих закономерностей, связанных с функционированием моделируемого объекта (в нашем случае системы «человек - электроустановка»). Цель же количественного анализа достигается решением задач априорной оценки эффективности СБЭ и прогнозирования соответствующих характеристик моделируемой системы.

В ряде работ в качестве показателя эффективности были предложены критерии уровня электробезопасности и уровня опасности электропоражения. Эти уровни оценивались соответствующими вероятностями электропоражения $P(ЭП)$ и электробезопасности $P(ЭБ)$, связанными между собой соотношением $P(ЭП) = 1 - P(ЭБ)$. В 1970-х годах при подготовке проекта ГОСТа «ССБТ Электробезопасность. Общие положения» была обоснована количественная мера электробезопасности, равная $0,5 \times 10^{-6}$. Введение в ГОСТ такой нормы даже в настоящее время соответствует наивысшему достигнутому в мире уровню электробезопасности. Вместе с тем установление вероятностных показателей (которые оценивали бы вероятность электропоражения человека за время T), не позволяло учитывать возможные последствия электротравмы, ее социальные и экономические аспекты. Обоснованная концепция риска электротравмы, устраняя этот пробел, позволяет оценивать качество функционирования СБЭ не только с технической (предотвращение электротравматизма), но и с экономической (уменьшение ущерба от несчастных случаев) стороны. Поэтому под показателем эффективности системы обеспечения электробезопасности условимся понимать количественную меру, определяющую степень соответствия результата функционирования всех компонентов СБЭ целям, стоящим перед этой системой. Как следует из данного определения, основной

задачей СБЭ является снижение электротравматизма (до приемлемого уровня) и его последствий (ущербов), что в конечном счете приведет к повышению рентабельности труда сельских жителей и созданию безопасных условий их проживания. [9]

Ниже сформулированы основные требования к разрабатываемым показателям эффективности СБЭ.

1. При определении показателей эффективности будем исходить из того, что они должны объективно характеризовать и иметь прямую связь с целевым назначением системы.

2. Выбранные показатели должны быть связаны с технической и экономической эффективностью рассматриваемых в системе (Ч-Э-С) процессов.

3. Выбираемые показатели должны базироваться на параметрах, характеризующих качество и свойства компонентов системы (Ч-Э-С). Эти показатели должны быть наглядными.

4. Анализ работ показал, что наиболее полно предъявляемым требованиям к СБЭ удовлетворяют вероятностно-детерминированные показатели. Действительно, данная группа показателей представляет интегральную характеристику качества тех систем, явления и процессы в которых имеют не только стохастический характер. Подтверждением этому является тот факт, что при оценке материального ущерба, вызванного различными видами электротравмы, опираясь на концепцию стоимости статистической жизни человека (цену риска), можно получать вполне определенные значения средних ущербов, тем самым обосновать затраты, необходимые на обеспечение электробезопасности.

С учетом изложенных требований будем считать базовым показателем эффективности СБЭ приемлемый уровень риска электротравмы $R_э(t)$, физический смысл которого можно интерпретировать как объективную меру, гарантирующую минимизацию количества электротравм и связанного с ними ущерба.

Показатель технической эффективности $П_{т.э.}$ представляет собой количественную оценку степени выполнения поставленной цели – создание безопасности электроустановок. В качестве этого показателя могут использоваться:

- вероятность электробезопасности человека на объекте, принадлежащему данному множеству N за время T – $P(ЭБ)$;

- математическое ожидание уровня электробезопасности на том же множестве – $M[P(\text{ЭБ})]$;

- математическое ожидание числа предотвращенных электротравм – $M(\text{ЭП})_{\text{пр}} = M(\text{ЭП})_{\text{б.з.}} - M(\text{ЭП})_з$,

где $M(\text{ЭП})_{\text{б.з.}}$ – математическое ожидание числа электротравм на множестве N за время T при отсутствии средств защиты,

$M(\text{ЭП})_з$ – то же на множестве N при наличии защитных средств.

В качестве показателей экономической эффективности, системы электробезопасности $П_{\text{э.э.}}$ могут быть рекомендованы:

- среднегодовой экономический эффект

$$\text{Э}_1 = Y_{\text{пред}} - Z, \quad (5)$$

где $Y_{\text{пред}}$ – предотвращенный материальный ущерб от электротравматизма после внедрения СБЭ; Z – затраты на создание СБЭ;

- полные затраты

$$Z_{\text{полн}} = Y_{\text{ост}} + Z, \quad (6)$$

где $Y_{\text{ост}}$ – остаточный (неустраненный) ущерб, который может иметь место и после внедрения СЭБ.

В свою очередь,

$$Y_{\text{пред}} = \frac{\sum_{i=1}^T M(\text{ЭП})_{\text{пр}i} \cdot Y_i}{T} \quad \text{и} \quad Y_{\text{ост}} = \frac{\sum_{i=1}^T M(\text{ЭП})_{\text{з}i} \cdot Y_i}{T}, \quad (7)$$

здесь Y_i – средний ущерб от гибели одного работника в j -м году рассматриваемого периода T .

В основе оценки экономической эффективности системы электробезопасности должен лежать расчет предотвращенного материального ущерба от электротравм и учет предотвращенных затрат, обусловленных возможными последствиями этих электротравм (выплата пенсий, пособий и т.д.).

Выбор тех или иных модификаций показателей эффективности осуществляется на основе установления области их применения. В самом деле, предложенные показатели следует использовать как к отдельным электроустановкам и объектам, так и к целым регионам и отраслям сельскохозяйственного производства. Такой дифференцированный подход к выбору модификаций показателей $П_{\text{т.э.}}$ и $П_{\text{э.э.}}$ обусловлен тем, что отдельные объекты и целые регионы с точки зрения электробезопасности обладают различными свойствами. Так,

на фермерском или личном подсобном хозяйстве, крестьянской усадьбе или в здании (например, сельской школы) случаи электропоражения людей крайне редки, тогда как электротравматизм на уровне региона или отрасли приобретает черты массового явления. Поэтому для объективной оценки уровня электробезопасности представляется целесообразным введение иерархической системы показателей, каждый из которых позволял бы учитывать указанные свойства основных ступеней сельскохозяйственного производства. Так, при оценке уровня электробезопасности в отрасли или регионе удобен показатель, учитывающий количество электротравм. Такой показатель может быть непосредственно получен на основе статистических данных по электротравматизму и использован для апостериорной оценки эффективности СБЭ. Применительно к отдельному объекту, в силу отмеченного его свойства, удобны показатели, характеризующие вероятность электропоражения человека. [10]

В таблице 3 приведена классификация показателей технической эффективности СБЭ, характеризующих уровень электробезопасности.

Здесь векторы вероятностей электропоражения $\bar{P}(\text{ЭП})$ и векторы вероятностей электробезопасности $\bar{P}(\text{ЭБ})$ позволяют учитывать в общем случае различную степень опасности поражения людей при эксплуатации различных видов нестационарных электроустановок на отдельных объектах.

При решении задач оптимизации уровень опасности электропоражения целесообразно оценивать по максимальному значению вероятности $P(\text{ЭП})$ или, соответственно, по минимальному значению вероятности $P(\text{ЭБ})$ на объекте.

Показатели $P(\text{ЭП})$ и $M(\text{ЭП})$ связаны между собой соотношением $M(\text{ЭП}) = P(\text{ЭП}) \times N$, справедливым при условии, что все люди, работающие на объекте (принадлежащие рассматриваемому множеству N), имеют одинаковые значения $P(\text{ЭП})$.

Показатели $M(\text{ЭП})$ и $M[P(\text{ЭП})]$ - математическое ожидание электропоражений и математическое ожидание вероятностей $P(\text{ЭП})$ соответственно, которые определяются как показатели технической эффективности СБЭ. Классификация показателей технической эффективности СБЭ приведена в таблице 3.

$$M(\text{ЭП}) = \sum_{j=1}^N P(\text{ЭП})_j \text{ и } M[P(\text{ЭП})] = \frac{\sum_{j=1}^N P(\text{ЭП})_j}{N}, \quad (8)$$

В качестве показателя, характеризующего уровень электробезопасности региона (отрасли), можно принять ожидаемое количество электротравм людей, имевших место за определенный период времени T .

Таблица 3 - Классификация показателей технической эффективности СБЭ

Характеризующие электрическую безопасность		Характеризующие пожарную безопасность	
Наименование показателя	Расчетное выражение	Наименование показателя	Расчетное выражение
Вероятность электропоражения человека на объекте	$P(\text{ЭП}) = \begin{bmatrix} P(\text{ЭП})_1 \\ \dots \\ P(\text{ЭП})_i \\ \dots \\ P(\text{ЭП})_N \end{bmatrix}$	Вероятность пожарной опасности на объекте	$P(\text{ПО}) = \begin{bmatrix} P(\text{ПО})_1 \\ \dots \\ P(\text{ПО})_i \\ \dots \\ P(\text{ПО})_N \end{bmatrix}$ $P(\text{ПО}) = 1 - \prod_{j=1}^N [1 - (ПО)_j]$
Вероятность электробезопасности человека на объекте	$P(\text{ЭБ}) = 1 - P(\text{ЭП})$	Вероятность возникновения пожара на объекте	$P(\text{ПО}) = \sum_i^M \prod_j^N \{P(\text{ПО})_{ij}\}$
Математическое ожидание уровня опасности электропоражения	$M(\text{ЭП}) = \frac{\sum_{i=1}^N P(\text{ЭП})}{N}$	Уровень пожарной безопасности на объекте	$Упб = \min_{j=1,N} \{P(\text{ПБ})_j\}$
Математическое ожидание уровня электробезопасности	$M(\text{ЭБ}) = 1 - [M(\text{ЭП})]$	Уровень пожарной опасности на объекте	$Упо = \max_{j=1,N} \{P(\text{ПО})_j\}$

Пусть в каком-либо регионе имеется Q объектов, каждый из которых характеризуется своими значениями $M(\text{ЭП})_k$, ($K = 1, Q$). Тогда математическое ожидание числа электротравм на множестве Q за рассматриваемое время T определяется выражением

$$M(\text{ЭП})_{\Sigma} = \sum_{k=1}^N M(\text{ЭП})_k, \quad (9)$$

Введение показателя $M(\text{ЭП})_{\Sigma}$ позволяет выполнить прогноз эффективности СБЭ в регионе и дать апостериорную оценку внедренной системы электробезопасности.

4. Методы анализа антропогенного риска электроустановок

К основным видам техногенных опасностей относится электрическая (или электромагнитная), которая в силу своей массовости проявляется во многих аварийных или нормальных режимах работы электроустановок, в виде электропоражения людей, пожаров и опасных электромагнитных излучений.

Рассмотрим процедуру построения системы обеспечения безопасности электроустановок (рисунок 4). При этом ограничимся лишь мероприятиями, направленными на предотвращение тех аварийных режимов, которые могут вызвать электрическое поражение людей и сельскохозяйственных животных, а также несчастные случаи при нормальной эксплуатации электроустановок. [11]

Подсистемы 1 и 2 выполняют функции анализа оценки и прогнозирования возможных аварий и несчастных случаев, а также выработки рекомендаций по корректирующим воздействиям на остальные подсистемы с тем, чтобы обеспечить снижение величины риска и создать условия для поддержания его на приемлемом уровне. Назначение подсистем 3-5 вытекает из их названия.

Целью анализа оценки и прогнозирования риска электротравмы является выявление и идентификация источников опасности от электроустановок с установлением связей в системе (Ч-Э-С), а также оценка ущерба, который может быть причинен пострадавшему человеку, организации, в частности, страховым компаниям, и в целом обществу. Ущерб возникает как результат логически связанных причинных факторов, приводящих к травмоопасным последствиям.

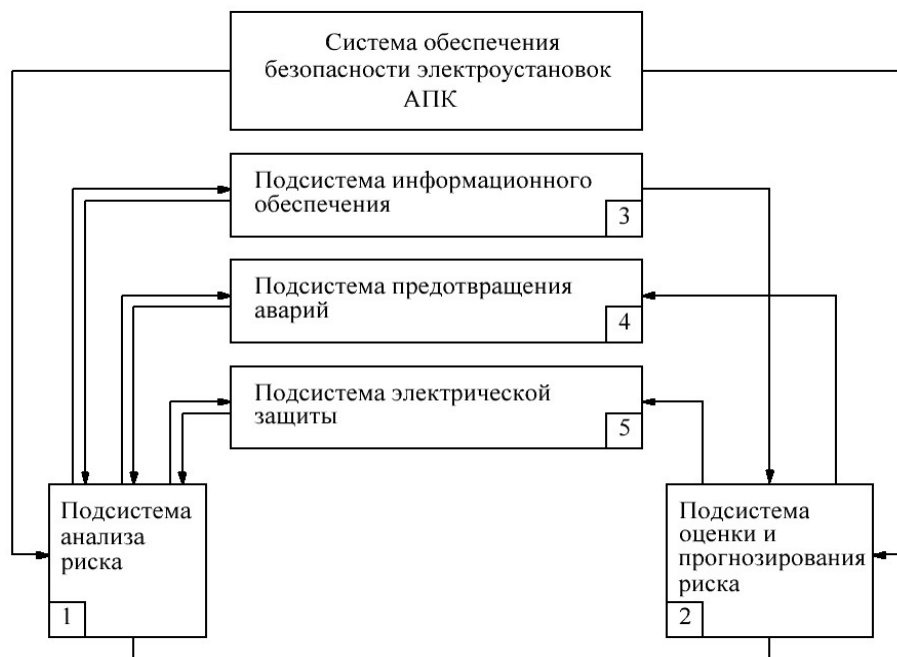


Рисунок 4 – Алгоритм построения СБЭ

При оценке риска в настоящее время широко используется системно-целевой подход, базирующийся на основополагающих принципах общей теории систем, включая теорию самоорганизации и эволюции сложных систем (синергетики). Сущность этого подхода состоит в изучении какого-либо сложного объекта (в нашем случае системы Ч-Э-С) с помощью системного анализа и системного синтеза.

При исследовании сложной системы вначале нужно расчленить ее на отдельные наиболее существенные (компоненты) для описания их свойств. Затем, устанавливая связи между компонентами, их совокупность рассматривать как органическое единство сложного объекта, обладающего качественно новыми системными свойствами.

Для изучения возникающих в системе (Ч-Э-С) травмоопасных ситуаций следует использовать методы моделирования, в общем виде включающие следующие этапы:

- учет наиболее существенных факторов, определяющих возникновение травмоопасной ситуации и ее последствий;
- составление смысловых (описательных) моделей;
- формализация ТС и оценка количественных характеристик.

При этом необходимо выбрать такие языки и алгоритмы, которые были бы достаточны для семантического представления реальных процессов, протекающих в системе (Ч-Э-С).

Наиболее полно рассматриваемой модели удовлетворяет формализованное представление системы в виде графических диаграмм причинно-следственных связей. На наш взгляд, предпочтительным являются диаграммы типа «дерева происшествий», которые обладают высокой информативностью представления и описания изучаемых явлений, хорошей наглядностью и декомпозируемостью, возможностью применения формализованных процедур системного анализа этих моделей и системного синтеза мероприятий, направленных на реализацию заданных целей системы.

Семантическая модель типа «дерева происшествий» включает одно головное событие, которое соединяется с помощью конкретных логических условий с исходными и промежуточными предпосылками, обусловившими в совокупности его появление. В нашем случае головное событие дерева представляет аварию электроустановки или несчастный случай, а его «ветви» - набор соответствующих предпосылок, образующих их причинные цепи. «Листьями» дерева происшествия служат исходные события - предпосылки (отказ электроустановки, ошибки оператора), дальнейшая детализация которых нецелесообразна. [12]

Основным этапом системного анализа является построение семантической модели возникновения происшествия и причиненного им ущерба. Сложность данного этапа обусловлена отсутствием в настоящее время строгих формализованных процедур его реализации, не обеспечивающих абсолютную идентичность моделей одного и того же происшествия, построенных различными исследователями. С учетом изложенного сформулируем основные требования к построению диаграмм типа дерева.

1. Модель должна состоять только из одного головного события, поэтому представим дерево происшествий в виде совокупности двух деревьев: дерева события (возникновения травмоопасной ситуации) и дерева исходов (последствия ТС).

2. Каждая из двух моделей содержит свое головное событие и некоторое множество предшествующих ему предпосылок - ошибки людей, поломка оборудования, негативные внешние воздействия.

Причем в состав этих деревьев следует включать все логические связи между имеющимися предпосылками, соблюдение которых необходимо и достаточно для возникновения травмоопасной ситуации.

3. Построение дерева событий и дерева исходов следует начинать не от исходных ошибок, отказов техники и опасных внешних воздействий - к головному событию, а наоборот. При этом само головное событие, соответствующие ему предпосылки верхнего и последующих уровней, а также образованные ими причинные цепи следует выявлять на основе знания общих закономерностей возникновения электротравмы.

Процедура анализа риска электротравмы может быть представлена в виде трех взаимосвязанных блоков:

- блок анализа первичной информации, предназначенный для выявления, идентификации и классификации видов опасности;
- блок вероятностей (частоты) возникновения случаев электротравм;
- блок составления сценариев прогнозируемых электротравм.

На рисунке 5 приведен алгоритм построения диаграмм дерева событий и дерева исходов.

Первый этап включает описание системы (Ч-Э-С). Здесь должна быть собрана и изучена следующая информация: структура объекта; пространственное размещение его элементов; основные виды работы, осуществляемые на электроустановке; отказы оборудования, имевшие место; эксплуатационная надежность электрооборудования; возможные ошибочные действия оператора и т.д.

Второй этап содержит таксономию потенциальной опасности и ее классификацию. На этом этапе важно выделить наиболее опасные источники.

Третий этап предназначен для выявления возможных инцидентов (электротравм). Анализ состоит в построении прецедентных сочетаний несчастных случаев: иницирующие события - промежуточные события - инцидент. При этом следует учитывать различные, возможные иницирующие события, такие как аварии электроустановки, отсутствие или отказ средств электрозащиты, ошибки оператора и т.д. На этом этапе будем использовать метод дерева событий в предположении, что верхнее нежелательное событие представляет собой электротравму.

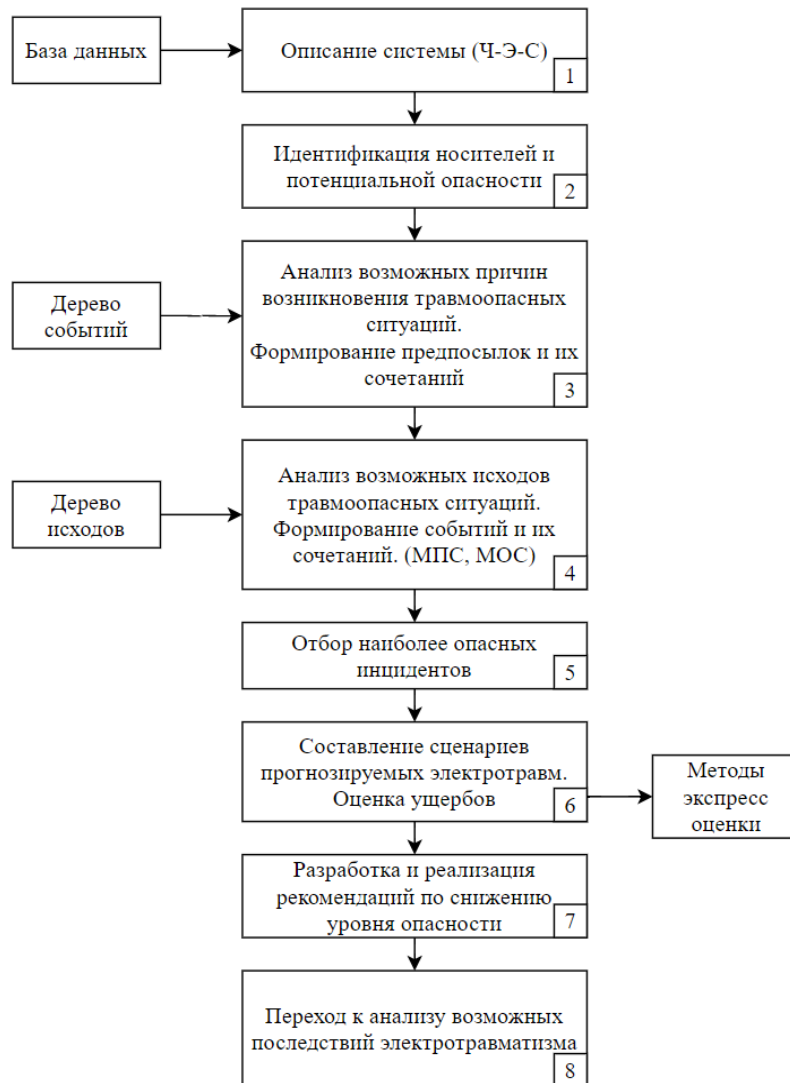


Рисунок 5 - Блок-схема построения диаграмм типа «дерево»

Четвертый этап - анализ постинцидентных сочетаний исходов, которые могут иметь место после инцидента — получения электротравмы. На этом этапе используем метод дерева исходов при условии, что здесь рассматривается в виде инцидента один из возможных его исходов (летальный, инвалидность, временная нетрудоспособность).

Пятый этап включает отбор наиболее опасных инцидентов и формирование окончательного итогового его списка. При составлении такого списка используются методы, позволяющие ранжировать инциденты и отбирать среди них наиболее опасные. [13]

Шестой этап предполагает составление сценариев несчастных случаев на основе итогового списка инцидентов и оценку возможных ущербов.

Заключительный блок содержит разработку рекомендаций по снижению уровня опасности электроустановок АПК.

5. Методы прогнозирования антропогенного риска и оценка остаточного ресурса

Рассмотрим процедуру анализа риска электробезопасности в виде двух взаимосвязанных этапов:

- прогнозирование и сравнительная оценка риска;
- управление индивидуальным (или совокупным) риском.

Назначением первого этапа является прогнозирование величины совокупного риска электротравматизма с учетом возможного ущерба от каждой отдельной травмы и сравнение величины риска с приемлемым значением. Назначение второго - разработка рекомендаций по снижению вероятности возникновения электротравм и возможного от них ущерба, направленных на достижение приемлемого риска при ограниченных экономических затратах.

Анализ риска можно рассматривать как проведение процедуры идентификации опасностей и количественной оценки риска применительно к человеку и окружающей среде. Одна из основных задач анализа состоит в получении объективной информации о состоянии изоляции электроустановки с целью установления остаточного ресурса и прогнозирования срока эксплуатации. Наиболее опасным элементом электроустановки является электропроводка. Ежегодно в АПК выходит из строя до 20% электропроводок зданий и сооружений.

В основе решения указанной задачи должны лежать научно обоснованные принципы, разработка которых потребует реализации таких общих вопросов, как:

- обоснование срока службы электропроводки и совершенствование критериев оценки безопасности;
- сбор и исследование сведений о случаях повреждения, развития аварий, возникновения травм и пожаров, анализ основных их причин;

-изучение деградации физико-механических свойств твердой изоляции проводов и кабелей и механизма изменения их характеристик в условиях эксплуатации;

- расчетное прогнозирование долговечности электропроводки в жилых и общественных зданиях в сельских населенных пунктах;

- создание и внедрение в инженерную практику пакета вычислительных программ для вероятностных оценок возникновения дефектов в электропроводках, приводящих к опасным последствиям, и расчета потенциального ущерба от них.

Перечисленное образует единый взаимосвязанный комплекс (рисунок б), в состав которого входят блоки научно- методического и нормативного обеспечения, выполнения организационно-технических мероприятий.

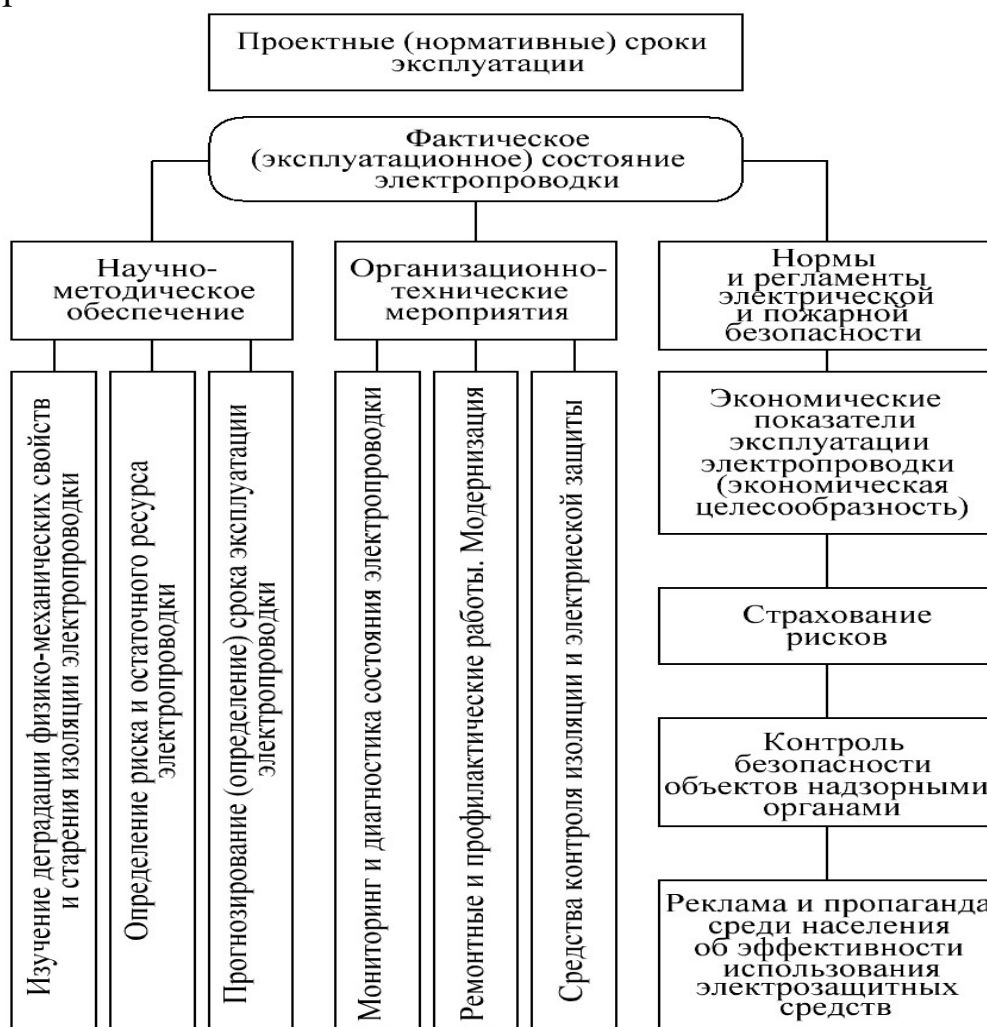


Рисунок б - Модель определения остаточного ресурса и сроки эксплуатации электропроводки

Важным при этом является решение задачи, связанной с определением оптимального срока службы эксплуатации электроустановки, ибо желание увеличить срок службы, с одной стороны, позволяет экономить материальные ресурсы, а с другой - повышает вероятность возникновения повреждений, аварий и т.д.

По нашему мнению, обоснование оптимального срока предполагает, во-первых, проведение диагностики технического состояния электропроводки путем оснащения объекта средствами автоматического контроля изоляции (устройствами защитного отключения), а во-вторых, количественную оценку риска и его сопоставление с нормативным значением. [14] Последнее сводится к процедуре выполнения методических и практических мер по управлению риском (рисунок 7). Отметим, что здесь следует отдавать предпочтение методам количественного анализа, сводящимся к расчету показателей риска путем умножения вероятности опасного события (аварии, травмы, пожара) на математическое ожидание ущерба (материальных потерь), вызванного этим событием.

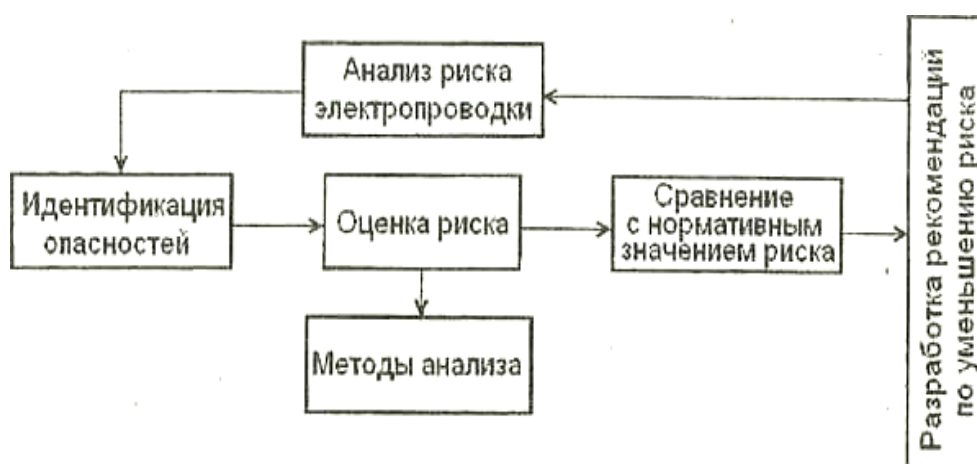


Рисунок 7 - Блок-схема управления риском

В общем случае прогнозирующая система может включать математические, логические и эвристические элементы. На вход системы поступает имеющаяся информация о прогнозируемом явлении электротравматизма; на выходе - выдаются данные о будущих параметрах явления, т.е. прогноз. Блок-схема прогнозирующей системы электротравматизма приведена на рисунке 8.

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**



Рисунок 8 - Блок-схема прогнозирования электротравматизма

В соответствии с рассматриваемой блок-схемой первым этапом при прогнозировании является сбор и анализ необходимой исходной информации о несчастных случаях. Здесь возможно получение статистических данных как путем использования ретроспективных сведений, так и с помощью автоматизированной системы сбора и анализа данных по электротравматизму. Причем данные, поступающие по двум каналам, не должны быть противоречивыми, а должны подтверждать достоверность полученной информации.

Второй этап прогнозирования состоит в создании математической модели травмоопасных ситуаций и их исходов (дерева событий и исходов), а также методического аппарата для определения неизвестных параметров модели. Необходимо заметить, что при создании моделей нужно исходить из целей и задач прогнозирования и учитывать так называемый интервал упреждения, в течение которого формируется банк статистических данных по электротравматизму.

Третьим этапом является проведение необходимых расчетов и визуализация их результатов.

На четвертом этапе производится оценка адекватности модели реальным явлениям и достоверности получаемых прогнозных ситуаций.

В настоящее время широко используются различные методы прогнозирования, в основе которых лежат математические и эвристические модели. Математические модели, в свою очередь, можно подразделить на детерминированные и вероятностные. Первые

основываются на установлении функциональных зависимостей между первичными критериями безопасности и параметрами системы (Ч-Э-С). Эти зависимости могут быть выражены в аналитической, графической или табличной формах. В вероятностных моделях учитывается стохастическая природа параметров, характеризующих источник электрической опасности, а также процессов формирования и исхода травмоопасных ситуаций.

К разновидности вероятностных моделей прогнозирования ТС следует отнести метод экстраполяции, с помощью которого на основании статистических данных по электротравматизму осуществляется оценка интересующих нас показателей на определенный временной интервал. Этот метод может найти применение, например, при прогнозе электротравматизма с различными исходами. В качестве прогнозируемого параметра могут выступать как макропоказатели, например, интегральный риск электротравматизма региона или сельскохозяйственной отрасли, так и макропоказатели - дифференцированные характеристики, определяющие исходы электротравмы.

Наиболее объективным показателем, который может быть использован для статистической оценки уровня электробезопасности в агропромышленном комплексе, на наш взгляд, является количество электротравм. Прогнозирование же размеров материального ущерба от них представляется затруднительным из-за отсутствия корреляции между этими двумя показателями. [15]

На рисунке 9 приведена динамика изменения показателя $M(\text{ЭП})$ (математического ожидания количества электротравм) в сельском хозяйстве за период с 1992 по 2007 гг. «Сглаживание» статистической кривой изменения среднегодового количества несчастных случаев, проведенное методом наименьших квадратов, позволило установить характер регрессионной зависимости, которая имеет следующий вид:

$$M(\text{ЭП})_i = 1,5 + 1,8e^{-0,2i}, \quad (10)$$

где $i=1,2\dots n$ - время, в течение которого были получены статистические данные по электротравматизму.

Как следует из графика, характерной чертой рассматриваемого периода времени явилась явно выраженная тенденция к постепенному снижению количества электротравм. Причиной здесь следует считать создание в России нормативной правовой базы в области охраны труда,

а также начавшееся внедрение комплекса эффективных организационно-технических мероприятий, регламентирующих безопасную работу в электроустановках до 1000 В. Вместе с тем следует отметить достаточно низкий, неудовлетворительный фронт снижения показателя $M(ЭП)$. Экстраполяция этого показателя подтверждает низкий уровень электробезопасности в отрасли, который будет сохраняться в будущем до тех пор, пока государство не примет действенных мер в этом направлении.

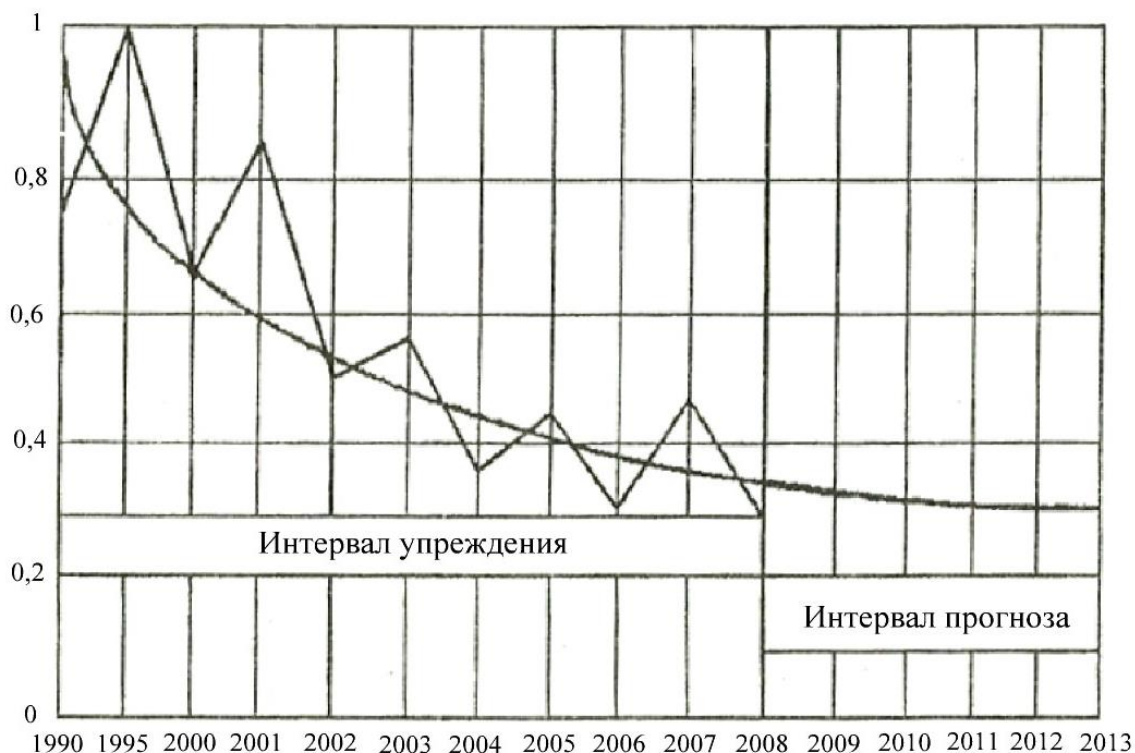


Рисунок 9 - Динамика изменения показателя $M(ЭП)$

Имеющиеся на кривой (рис. 9) «всплески» и «провалы» в значениях показателя $M(ЭП)$ подтверждают гипотезу о случайном возникновении этих событий. Несмотря на то, что каждая электротравма в этом потоке обусловлена конкретными «своими» причинами, можно сделать предположение, что весь поток электротравм, как редких событий, подчиняется дискретным распределениям биномиального типа. Наиболее подходящим для описания частоты электротравм является распределение Пуассона.

$$f_n = a^n \exp(-a), n = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

где n - число электротравм, a - параметр распределения.

Математическое ожидание и дисперсия для распределения Пуассона соответственно равны:

$$M\{n\} = \sum_{n=0}^{\infty} n f_n = a, \quad D\{n\} = \sigma_n^2 = M\{(n-a)^2\} = \sum_{n=0}^{\infty} (n-a)^2 f_n = a \quad (12)$$

На основании теоремы Бернулли средняя частота рассматриваемых событий (электротравм), равная a/n , при бесконечном росте n стремится к вероятности электротравм:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a}{n} = P_{ЭТ} \quad (13)$$

Тогда f_n можно представить как

$$f_n = \frac{1}{n!} (nP_{ЭТ})^n \exp(-nP_{ЭТ}) \quad (14)$$

Причем $P_{ЭТ}$ не должна превышать значения верхнего допустимого (нормируемого) уровня риска.

Наряду с математическими методами прогнозирования электротравматизма могут быть использованы эвристические, в частности, дельфийский метод, суть которого состоит в проведении экспертного прогнозирования путем организации системы сбора экспертных оценок и их статистической обработки. Несмотря на содержащуюся в нем долю субъективизма, заключающуюся в интуитивном мнении отдельных специалистов - экспертов, этот метод в сочетании с аналитическим дает не только достоверные и качественные результаты прогноза, но позволяет составить возможные сценарии будущего. Эвристический метод свободен от формализованных математических описаний и позволяет прогнозировать событие на ближайшие 10-15 лет, учитывая при этом возможное «вмешательство» внешних факторов, социально-экономического и политического характера. [16]

В качестве иллюстративного примера рассмотрим проблему электробезопасности отрасли, выдвинув два сценария:

1. Инерционный, связанный с продолжением нынешнего курса научно-технической политики, заключающегося в остаточном принципе финансирования мероприятий по охране труда, несовершенстве нормативной правовой базы и т.д. Устойчивой тенденцией стало сокращение государственных затрат на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Так, за последнее десятилетие доля расходов на науку в бюджете страны

составляет менее 2 % вместо декларируемых - 4 %. Таким образом, принимая за основу сложившуюся в стране практику недофинансирования научно-технической сферы, можно предполагать, что в ближайшие 5 - 10 лет Россия сохранит свое отставание от развитых стран в области обеспечения техногенной безопасности, в т.ч. электробезопасности.

2. Инновационный сценарий, в основе которого лежит наращивание инвестиций в научно - технологическую сферу.

Этот сценарий строится на следующих предпосылках:

- в стране сохраняется научный потенциал для технологического прорыва, который должен стать базовым для инвестиций;

- необходимо освоить невостребованную в стране интеллектуальную собственность, стоимость которой оценивается порядка 400 млрд. дол. США;

- прирост инвестиций в научно - технические разработки должен идти не только за счет бюджета, но и активизации частного капитала. При этом предполагается, что увеличение объема инновационной продукции в 2015 году увеличится в 5 раз.

Реализация второго сценария будет означать создание базовых условий для перевода отечественной экономики на инновационный путь развития. Однако сравнение возможности в реализации сценариев складывается в пользу первого из-за причин, указанных выше.

6. Методы оценки и управления антропогенными рисками опасности электроустановок

Для обоснования общей методологии исследования безопасности рассмотрим следующие базовые понятия.

Опасность (техногенная) - угроза (потенциальная возможность причинения ущерба человеку, материальным объектам (имуществу)) и окружающей среде вследствие каких-либо негативных происшествий техногенного характера. При этом опасность электроустановки следует характеризовать как возможную (потенциальную) аварию, травму, пожар на каком-либо объекте. Поэтому количественно оценить степень опасности можно после совершения негативного события.

Безопасность электроустановки - имманентное свойство сохранять её при нормальной эксплуатации и в случае аварии или

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

другого негативного происшествия ограничивать риск с минимальным причинённым ущербом.

Авария электроустановки - непредвиденный выход из строя, повреждение или её разрушение, сопровождающийся ущербом, перерывами электроснабжения, технологическими простоями.

Катастрофа (техногенная) - внезапное бедствие с трагическими последствиями, несущее серьёзную угрозу жизни и здоровью значительных групп населения, приводящее к нарушению привычного уклада жизни людей и нарушению целостности окружающей среды. В качестве примера катастрофы можно привести крупные пожары от электроустановок опасных производственных объектов или общественных зданий.

Аварийные (опасные техногенные) ситуации в электроустановках - состояние, характеризующееся нарушением условий безопасной эксплуатации, не перешедшее в аварию или несчастный случай.

Инцидент в электроустановке - нарушение работы, выражающееся в отклонениях от регламентированного режима её эксплуатации, которое может быть вызвано ошибкой человека (персонала).

Чрезвычайная ситуация (термин МЧС) - экстремальная обстановка на определённой территории, сложившаяся в результате аварии (в нашем случае, пожара), характеризующаяся значительными социально экологическими или экономическими ущербами и потерями. Поэтому чрезвычайная ситуация рассматривается как последствие аварии или катастрофы.

Рискообразующий фактор (РОФ) - негативное проявление взаимосвязей человеко-машинной системы (Ч-Э-С), приводящее к возникновению предпосылок и инцидентов.

Изучение причин аварий и травматизма показало, что среди используемых в настоящее время видов энергии большую опасность представляет энергия электрического тока и электромагнитного поля, носителями которых являются системы электроснабжения и электроустановки. [17] Анализ статистических данных показывает, что характерной чертой аварий, травм и пожаров является некоторая совокупность так называемых иницирующих условий (предпосылок), образующих причинно-следственные цепи. Наиболее типичной

причинной цепью, как уже отмечалось выше, представляется последовательность следующих предпосылок:

- ошибки человека (оператора, персонала, населения);
- отказы электроустановок (в т. ч. отсутствие или неисправность средств защиты);
- негативные (сверхнормативные) воздействия факторов внешней среды.

Несмотря на то, что перечисленные предпосылки являются случайными, можно установить присущие им закономерности. Во-первых, возникновение каждого техногенного происшествия следует рассматривать как следствие не отдельной причины, а результат появления цепи соответствующих предпосылок. Во-вторых, все виды опасностей, возникающие в электроустановках, можно интерпретировать как поток случайных событий, количество которых на ограниченном интервале времени (например, одного года) распределяется по закону Пуассона, а время между появлением отдельных происшествий - по экспоненциальному распределению.

В основе решения практических задач, направленных на снижение (предупреждение) техногенных опасностей в электроустановке и их последствий, должна лежать методология оценки и управления рисками, включающая в себя обоснование интегрального показателя эффективности систем безопасности с учётом необходимых затрат и предотвращённого ущерба. В настоящее время сформулирована единая научно обоснованная методология, обеспечивающая закономерности возникновения и развития техногенных опасностей, сущность которой базируется на так называемой энергоэнтропийной концепции. Применительно к электроустановкам (рисунок 10) к основным положениям этой концепции, не противоречащим фундаментальным законам энтропии, отнесём:

1) Эксплуатация электроустановок потенциально опасна, т.к. связана с электропотреблением и накоплением энергий.

2) Энергия электроустановки обладает свойством переходить в тепло, равномерно распределяемое среди окружающих тел; т.е. система стремится перейти в состояние максимальной энтропии, характеризующееся отсутствием энергетических потенциалов. Попытки вывести систему из состояния наибольшей степени

дезорганизации требуют преодоления естественных энергетических барьеров и рассматриваются как приводящее её в неустойчивое опасное состояние.

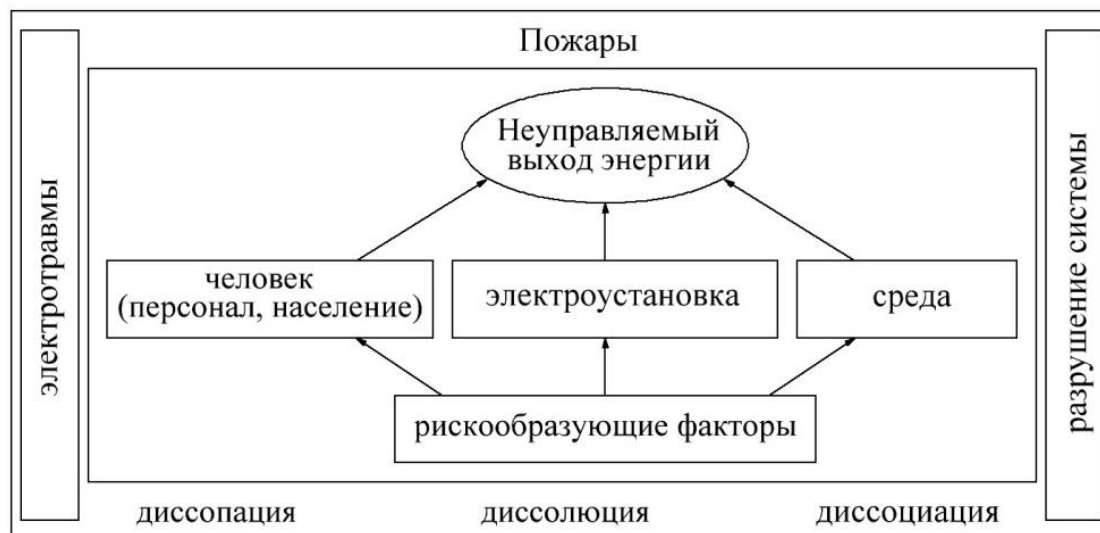


Рисунок 10 – Иллюстрация энергоэнтропийной концепции техногенных опасностей электроустановки

3) Опасность электроустановки проявляется в результате неуправляемого выброса энергии, накопленной в технологическом электрооборудовании. Выброс энергии приводит к повреждениям электроустановки, электротравматизму людей, загрязнению окружающей среды (пожарам).

Таким образом, опасность электроустановок обусловлена естественным стремлением энтропии к постепенному или скачкообразному ухудшению свойств материального объекта из-за разрушения связей между его элементами. Ущерб электроустановки проявляется в процессе её старения и износа, формирования происшествий, которые рассматриваются как результат неконтролируемого высвобождения энергии и опасного её воздействия на человека и среду обитания. Изложенное является основанием считать, что система (Ч-Э-С) относится к категории открытых нелинейных систем, её поведение представляется слабо предсказуемым. Опасные экстремальные явления в электроустановках, связанные с неконтролируемыми выбросами энергии, обуславливаются специфическим режимом функционирования - неустойчивостью техногенной системы, что вызывает поражающие

события в виде тяжёлых аварий, электротравм и пожаров. [18] Анализ эмпирических распределений опасных выбросов энергии показывает, что эти распределения не описываются нормальным законом, а имеют так называемые «тяжёлые хвосты». Иницилирующими или исходными событиями выбросов могут быть внутренние и внешние факторы. Внутренние факторы - отказы электроустановки и её элементов (электрической защиты), ошибочные действия персонала и т.д. Внешние факторы опосредованно могут оказывать негативное воздействие на функционирование рассматриваемой человеко-машинной системы (к ним следует отнести состояние законодательной и нормативной базы, макроэкономические показатели региона и др.).

Выделим наиболее типичные виды аварий системы (Ч-Э-С):

- режимные, возникающие при штатном функционировании электроустановки, обеспечивающие прогнозируемые последствия и нормативную защищённость персонала и населения;

- проектные, обусловленные выходом за допустимые пределы эксплуатационных режимов с приемлемым риском и достаточной защищённостью;

- запроектные, вызванные необратимыми повреждениями отдельных элементов электроустановки, гибелью людей и высокими ущербами; степень защищённости низкая и объекты требуется вывести в ремонт;

- гипотетически экстремальные, характеризуется как не учитывающие проектными решениями возможные варианты и сценарии развития тяжёлых аварий и катастроф со значительными человеческими жертвами и потерями, экологическими ущербами; объекты не подлежат восстановительным работам.

В соответствии с рассмотренной выше энергоэнтропийной концепцией представляется возможным введение обобщённого понятия безопасности электроустановки, под которой будем понимать имманентное свойство человеко-машинной системы сохранять при её функционировании в заданных (сложившихся) условиях такое состояние, при котором с достаточно высокой (нормативной) вероятностью исключаются опасные техногенные события, и минимизируется ущерб (не превышающий допустимого уровня) от неизбежных поражающих и вредных энергетических выбросов. Заметим, что при исследовании человеко-машинных систем получили

широкое применение методы анализа и синтеза больших систем. Опираясь на эти методы, можно считать, что объектом системного анализа и синтеза является человеко-машинная система (модель «Ч-Э-С»), а предметом изучения - выявление природы объективных закономерностей возникновения и предупреждения техногенных опасностей при её функционировании.

Изложенное позволяет обобщить основные положения системного исследования техногенной безопасности электроустановок:

1) Взаимосвязь человека с электроустановкой в процессе производства или в быту потенциально опасна, т.к. выполнение любых технологических операций требует потребления электроэнергии.

2) Опасность электроустановки - имманентное её свойство, проявляющееся в возможности причинения ущерба (вреда) человеку, материальным объектам и окружающей среде при эксплуатации (обслуживании) ЭУ.

3) Опасность может быть реализована при совмещении в пространстве и времени трёх независимых факторов:

- а) наличие электроустановки,
- б) присутствие потенциальной жертвы (человека, животного),
- в) создание опасной ситуации.

При этом необходимо различать два вида опасности ЭУ:

- а) реальная - существующая в данный момент времени и
- б) потенциальная, для реализации которой необходимо определённые условия.

Другими словами, опасность проявляется через связь двух сторон, где в качестве субъекта (носителя) опасности выступают технологические процессы в ЭУ, ошибки, негативное влияние среды, а объектом опасности являются люди, животные, материальные объекты.

4) Человеко-машинная система - совокупность трёх компонентов (человек, электроустановка, среда), объединённых общей целью и функциональной средой, предназначенных для изучения и описания причинно-следственных связей, приводящих к возникновению опасностей. Основная цель изучения этой системы - выработка превентивных мер предупреждения негативных происшествий и снижение их последствий.

Учитывая, что понятия опасности и безопасности электроустановок являются одними из базовых и наиболее сложных, т.к. содержат в себе другие нечётко определённые термины и показатели, дадим некоторые пояснения:

1) Техногенная опасность проявляется в процессе функционирования системы (Ч-Э-С), обладающей определёнными свойствами риска.

2) Риск рассматривается как мера опасности и характеризуется вероятностью возникновения негативного события (аварии, электротравмы, и др.) и тяжестью его последствия.

3) Техногенный ущерб - результат изменения устойчивого состояния (гомеостаза) системы (Ч-Э-С), которое характеризуется утратой её целостности и ухудшением свойств компонентов из-за появления техногенных происшествий, которые повлекли за собой гибель людей, аварии, материальные ущербы и потери.

Поэтому безопасность системы (Ч-Э-С) следует рассматривать как свойство сохранять при её функционировании такое состояние, при котором достаточно с высокой вероятностью исключаются негативные происшествия, а ущерб от неизбежных энергетических выбросов не превышает допустимого (заданного) уровня. Отметим, что рассмотренная энергоэнтропийная концепция подтверждается многолетней практикой эксплуатации электроустановок. [19]

Известно, что теория систем, в основе которой лежат процедуры декомпозиции (анализ) и агрегирования (синтез), обладает специфическим формальным аппаратом, ориентированным на решение различных научно-практических задач. Этот аппарат предусматривает как математическое обоснование процедуры многокритериального выбора стратегий, обеспечивающей, например, оптимизацию интегрального риска электроустановки, так и применение экспертных оценок и логических формальных подходов. Другими словами, для каждой предметной области существует определённая совокупность приемлемых средств формального выражения сущностей изучаемого реального объекта. При этом наиболее значимым здесь представляется выбор адекватной модели, отражающей цели исследования и ограничения, степень полноты знаний о системе и процессах, подлежащих моделированию, а также характеристика среды и параметры возмущающих воздействий.

Необходимо учитывать, что применение строго формализованных подходов ведёт к потере семантики (смыслового выражения предмета исследования). В этом случае моделирование человеко-машинной системы (Ч-Э-С) должно содержать многошаговую процедуру от вербального-словесного портрета системы к логико-лингвистическим представлениям и аналитическим математическим описаниям, включая имитационное.

В рамках сформулированных выше задач исследования рассмотрим основные подходы и методы анализа техногенных рисков, регламентируемые действующими нормативными документами.

Детерминистический метод. Сущность этого метода состоит в том, что человеко-машинная система считается не неопределённой (в частности, вероятностной), а строго детерминированной, в основе которой лежит причинно-следственный сценарий развития аварии, несчастного случая и т.д., т.е. каждой действие вызывает строго определённый результат.

Детерминированные модели строятся по упрощённой схеме, пренебрегая всякого рода случайностей. Главенствующим здесь является принцип причинности: одно явление (причина) при выполнении определённых условий порождает другое явление (следствие).

Детерминистический подход к оценке техногенного риска электроустановки связан с заданием и последующей проверкой обязательных требований надёжности, безопасности и эргодичности, содержащихся в нормативных документах. Этот подход предполагает проведение экспертных проверок органами Ростехнадзора и Госпожнадзора. Процедура экспертного оценивания может быть построена как на качественном уровне, так и на получении некоторых интегральных критериев, отражающих состояние системы (объекта) в целом. С помощью рассматриваемого метода можно судить - насколько полно выполняются требования действующих нормативных документов.

Детерминистический подход к проектированию человеко-машинных систем реализуется на основе полностью определённых исходных данных о параметрах воздействия и свойствах объекта с установлением коэффициентов запаса предельных (критических) состояний контролируемых рискообразующих факторов.

Достоинством метода является наглядность и простота, не требующая математического описания системы. К недостаткам метода следует отнести невозможность получения адекватных оценок из-за пренебрежения случайными факторами. Проблематичной также представляет процедура получения интегральных показателей: распространенный способ «линейной свертки» вида

$$L_i = \sum l_i \cdot \alpha_i, \quad (15)$$

где l_i - экспертная оценка частного показателя, α_i - вес показателя, является недостаточно правомерным, т.к. компоненты человеко-машинной системы являются не однотипными (имеющие различную физическую природу). Из этих соображений процедура «осреднения» лишается какого-либо смысла.

Статистический метод. Метод анализа риска электроустановки основан на обобщении информации о частоте возникновения опасных техногенных ситуаций на объектах агропромышленного комплекса.

По существу, статистическая модель представляет собой аналитическое выражение, в котором обеспечивается учёт влияния случайных факторов в процессе функционирования системы (Ч-Э-С). Эта модель оперирует количественными критериями при оценке повторяющихся явлений (например, электротравмы) и позволяет учитывать динамику изменения их во времени, нелинейность, случайные возмущения рискообразующих факторов внешней среды. Поэтому статистическая модель характеризуется уровнем неопределённости знаний об изучаемом объекте. Однако эти знания восполняются в процессе сбора и анализа исходных данных в результате выборочного обследования. Используя далее методы математической статистики, можно вскрыть определённые закономерности, свойственные большим выборкам однородных событий (или явлений). [20]

В случае неоднородных событий различной природы статистические подходы также могут быть использованы, проведя предварительную систематизацию (кластеризацию) опасных событий по следующим типам и масштабам:

- отказы, аварии, несчастные случаи (электротравмы), пожары;
- локальные, объектовые, местные, региональные, национальные.

Тогда вероятность опасных событий за интервал времени Δt можно оценить через их частоту (интенсивность) при рассмотрении последних как потока случайных событий, обладающих свойствами:

- ординарности (за достаточно малое Δt происходит не более одной ОТС);
- отсутствия последствия и стационарности (частота ОТС $\lambda(t)=const$).

При этих условиях поток ОТС рассматривается как простейший пуассоновский, для которого число n ОТС, происходящих в течение времени Δt , распределено по закону Пуассона:

$$F(N) = P(n \leq N) = \sum_{k=0}^N P(k), \quad (16)$$

где $P(k) = \frac{1}{k!} L(\Delta t)^k \exp(-L(\Delta t))$ - вероятность к ОТС в течение времени Δt ; $\alpha(\Delta t) = \lambda \Delta t$ - параметр распределения Пуассона (среднее число $\alpha(\Delta t) = M[n]$ ОТС в течение времени Δt);

λ - частота (среднее число ОТС за единичный и достаточно малый интервал времени (ед. времени)⁻¹).

Полагаем, что с увеличением интервала наблюдения $T \gg \Delta t$, будет возрастать также и число ОТС. Если принять, что $\alpha(\Delta t) = \lambda \Delta t \rightarrow \infty$, тогда распределение Пуассона приближается к нормальному с параметрами $M_{[n]}$ и $D_{[n]}$.

В этом случае вместо (16) можно применять уравнение (17)

$$F(N) = \Phi\left(\frac{N - M[n]}{\sqrt{D[n]}}\right), \quad (17)$$

где Φ - функция Лапласа.

Практически нормальным распределением пользуются при условии, что число опытов (однородных данных) должно быть более 100.

Повышение точности оценок требует увеличения объёма статистических данных, что связано с увеличением интервала наблюдения. Последнее в силу ряда обстоятельств, например, из-за множества влияющих неконтролируемых факторов, приводит к неоднородности статистических данных, что, в свою очередь, вызывает статистическую неопределённость, повышающую погрешность оценок риска и ограничивая область применения статистического метода.

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

Для обработки результатов наблюдений используются методы корреляционного, регрессивного, факторного и кластерного анализа, оперирующих статистическими гипотезами.

Вероятностно-статистический метод. Метод основан на проведении вероятностного анализа техногенных рисков системы (Ч-Э-С). Этот метод предполагает расчёт вероятности возникновения ОТС на основе статистических данных.

При этом будем различать апостериорное и априорное оценивание техногенного риска. Апостериорная оценка предполагает, как уже отмечалось, использование понятия «частоты» возникновения ОТС. Если производится прогнозирование негативного события, то априорное оценивание предполагает использование термина «вероятность». При этом следует учитывать, что частота возникновения ОТС имеет вероятностный характер, а сама вероятность трактуется как возможность.

Теоретико-вероятностный метод. Диаграммы влияния. Метод базируется на стохастической природе возникновения отказов и аварий и других опасностей техногенного характера. При этом оценка вероятности аварий производится по известному алгоритму от идентификации инициирующих событий до построения специальных диаграмм. Математические модели представляются более упрощёнными в сравнении с детерминистическими схемами расчёта. Основные ограничения применения вероятностного анализа риска (ВАР) связаны с недостатком статистической информации по отказам электрооборудования, методической сложностью оценки социального (гуманитарного) ущерба, вызванного гибелью человека, и отсутствием функций распределения диагностических параметров ЭУ. [21]

Логико-лингвистический метод. Метод анализа риска ЭУ характеризуется высокой степенью формализации, используя при этом символичный язык логики и формализм теории графов и алгоритмов. Строгость логических отношений может варьироваться в широких пределах, от классического детерминизма до вероятностной логики.

Одним из видов логико-лингвистических моделей является сценарий, в основе которого лежат функции алгебро-логики. Базовое положение этого метода состоит в исследовании истинности опасного техногенного события. Для этого вводятся булевы функции, обозначенные числами (1-истина, 0-ложь). Тогда сценарий

возникновения ОТС может быть выражен в виде развёрнутых во времени последовательностей взаимосвязанных состояний человеко-машинной системы (Ч-Э-С). В этом случае процедура оценки безопасности и рисков проводится с помощью соответствующего семантического и лингвистического моделирования.

Метод имитационного моделирования. Метод основан на логико-математическом представлении человеко-машинной системы как динамической. Данный класс моделей применяется при невозможности строгого аналитического решения задачи или проведения натурного эксперимента. Применительно к рассматриваемой человеко-машинной системе (Ч-Э-С), характеризующейся сложной неоднородной структурой, стохастичностью, нестационарностью и неопределённостью, имитационное моделирование является единственным инструментом анализа.

Метод имитационного моделирования находит широкое применение при анализе сложных систем, описывающих опасные производственные объекты. Метод позволяет использовать любую (качественно-количественную) информацию в сочетании с эвристическими неточными оценками, полученными интуитивным путём.

Экспертный метод. Экспертный метод основан на использовании знаний и опыта экспертов - квалифицированных специалистов в рассматриваемой предметной области. Этот метод применяется в том случае, когда отсутствуют не только статистические данные по объекту, но и достаточно сложно подобрать адекватную математическую модель.

Сущность экспертного метода оценки риска в системе (Ч-Э-С) заключается в процедуре формирования оценочной шкалы. Высказывания (суждения) экспертов оформляются в виде качественных характеристик или количественных значений вероятностей рассматриваемых событий, отнесённых к определённому отрезку времени.

Алгоритм экспертного метода достаточно широко применяется и состоит в том, что результаты экспертных оценок рассматриваются в виде случайных величин. Допустим, что каждый эксперт задаёт значение возможного ущерба с указанием вероятности его реализации.

С учётом N экспертов в конечном итоге можем получить распределение дискретной случайной величины. Таким образом, в результате проведения этой процедуры формируется совокупность случайных величин, значения которых отражают точку зрения группы экспертов относительно прогноза рассматриваемой величины

$$M_j(\tau) = \sum_{j=1}^N M(\tau / S_j), j = 1, \dots, N, \quad (18)$$

где S_j - информация, которую получил эксперт с соответствующим номером j .

Метод экспертных оценок при отсутствии достоверных статистических данных удобно сочетается с использованием так называемых базовых лингвистических оценок, которые позволяют в трёхмерном векторном пространстве получить интегральную оценку техногенного риска электроустановок. Использование в данной работе трехпараметрического метода анализа позволяет учитывать специфику электроустановки, в которой фактор времени воздействия электрического тока на человека или объект, является решающим при электротравме или возникновении пожара.

К недостаткам экспертного метода следует отнести сомнительность о достоверности полученных оценок, а также определённые трудности в проведении экспертного опроса и обработки полученных данных. В этом случае представляет интерес разработка процедур и алгоритмов, позволяющих уменьшить долю субъективизма в итоговой оценке риска. Тем не менее, для решения задач прогнозирования и управления техногенным риском в человеко-машинных системах, обладающих свойством неопределённости, по нашему мнению, перспективным представляется применение комбинированных приёмов, сочетающих доступность и широту качественных методов анализа и эффективность количественных оценок на базе построения строгих математических моделей. [22]

Метод нечетких множеств (МНМ). Метод нечётких множеств может быть применён при оценке опасности электроустановки в сложных системах, когда роль человеческого фактора является доминирующей. Этот метод относится к классу логических моделей, в основе которых лежит понятие "высказывание" - языковое выражение, имеющее смысл, с помощью которого можно утверждать, что оно истинно или ложно. Логические модели широко используются для описания системы знаний в различных предметных областях, в том

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

числе в области техногенной безопасности. В таких моделях для семантического описания человеко-машинной системы используются формальные средства теории множеств.

Рассмотрим сущность МНМ и его прикладные аспекты. Известно, что сбор и обработка данных, характеризующих техническое состояние электроустановки, сопряжены с анализом значительных объёмов информации. Использование традиционных методов анализа риска, как было показано выше, требует априорных исходных данных о процессах, протекающих в ЭУ. Применение современных аппаратурных средств, например, интердиагностики, позволяющей визуально анализировать физические поля, экономически неоправданно. В этой связи представляется перспективным использование интеллектуальных информационных систем, с помощью которых можно построить многоуровневый автоматический классификатор. Этот классификатор позволяет на основе имеющейся совокупности (множества) рискообразующих факторов рассматриваемой человеко-машинной системы в условиях неопределённости дать количественное описание сценариев возникновения и развития опасностей электроустановки объекта.

Отметим, что применение аппарата НЛ представляется перспективным, поскольку не требуется априорных знаний статистических распределений и их числовых оценок параметров рассматриваемой системы. Аппарат НЛ позволяет на основе имеющегося множества разнородных факторов компонентов человеко-машинной системы построить инфологическую кластерную модель с использованием символьного, а не числового способа представления значений. В качестве методов обработки информации применяются процедуры логического вывода и эвристического поиска принятия решения. Таким образом, для оценки безопасности и рисков человеко-машинной системы (Ч-Э-С) проводятся соответствующее семантическое и логико-математическое моделирование, определяется совокупность рискообразующих факторов, вводятся управляющие действия и обратные связи. Устанавливается кластеризация техногенных рисков с различной степенью градации (чрезвычайно высокий, очень высокий, высокий, средний, и т.д.). Далее формируются альтернативы, логические системы с нечёткими отношениями, логический нечёткий вывод. Метод позволяет не только

определить техногенные риски системы, но и интегральную характеристику технического состояния объекта, а также оценить остаточный ресурс электроустановки, тем самым, принять соответствующие меры по предотвращению отказов и аварий.

7. Анализ ущербов от антропогенных рисков в электроустановках

При оценке интегрального риска электроустановки необходимо определение не только вероятности ОТС, но и учёт всех видов потерь и издержек, т.е. оценка полного интегрального ущерба.

Рассмотрим риск как количественную меру опасности

$$R = \sum_i^n P_i Y_i, \quad (19)$$

при условии, что могут возникнуть n опасных событий i с различными вероятностями P_i и соответствующим им ущербом Y_i . Тогда выражение интегрального риска может быть представлено как

$$R_\Sigma = \int F(Y)P(Y)dY, \quad (20)$$

где $F(Y)$ - весовая функция потерь, с помощью которой последствия опасностей различной природы приводятся к единой (стоимостной) оценке ущерба;

$P(Y)$ -плотность распределения случайной величины Y .

В такой формулировке риск, как уже отмечалось выше, являющийся количественной мерой опасности, фактически определяется как математическое ожидание ущерба (потерь).

Будем считать ущерб как некоторый экономический количественный показатель, являющийся составной частью вреда от происшествий, наносимых физическим и юридическим лицам. В этом случае вред можно интерпретировать как цепь последовательных взаимосвязанных негативных событий, распределённых в пространстве и во времени. Для учёта наносимых электроустановкой разновидностей вреда введём понятие интегрального ущерба - комплексного показателя последствий наступивших техногенных опасностей объекта, выраженного в едином денежном эквиваленте. Этот показатель позволяет применить механизм исчисления экономической эффективности при оптимизации системы обеспечения безопасности электроустановок на этапах проектирования и эксплуатации. [23]

Виды ущербов, критерии их оценки. Рассмотрим структуру интегрального ущерба в рамках сложной человеко-машинной системы (Ч-Э-С), представленной на рисунке 11.

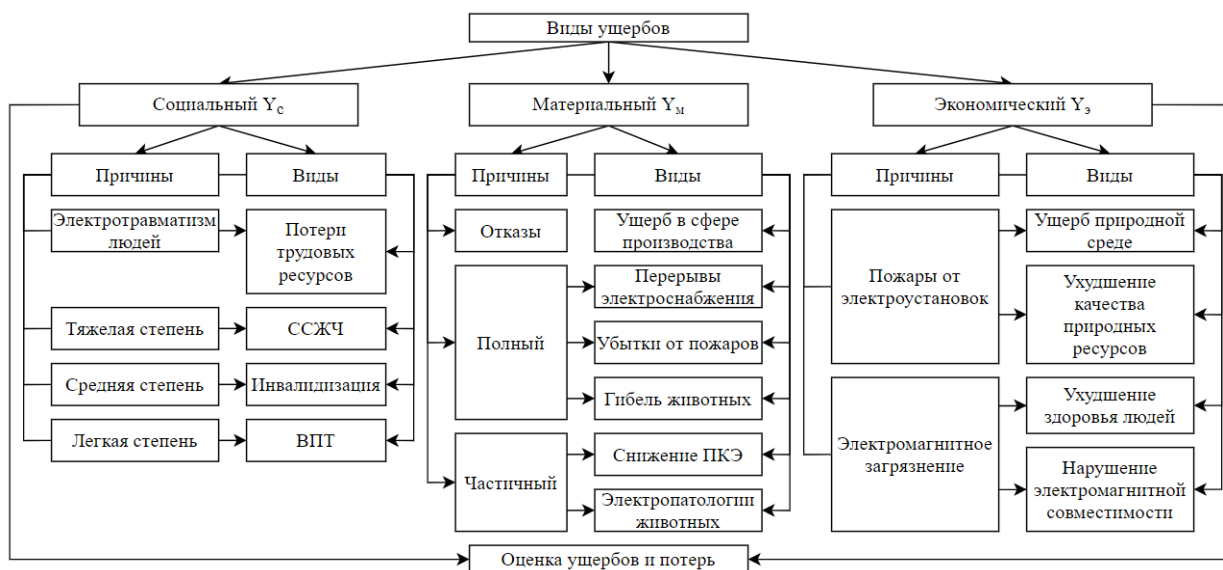


Рисунок 11 - Структура интегрального ущерба ЧМС «Ч-Э-С»

В соответствии с принятой классификацией полный ущерб складывается из прямого и косвенного, каждый из которых, в свою очередь, содержит социальную, материальную и экологическую составляющую ущерба. Считаем, что полный ущерб в достаточной степени отражает все издержки, являющиеся компонентом интегрального риска. Поэтому полный ущерб в определённой степени отражает интегральный ущерб электроустановки.

Условимся считать, что прямой (непосредственный ущерб) обусловлен утратой работоспособности ЭУ (выход из строя, т.е. отказ). Косвенный ущерб, являясь следствием прямого, в общем случае, определяется разрушением связей между электроустановкой и другими (сторонними) объектами, использующими электроэнергию для технологических нужд.

Рассмотрим составляющие интегрального ущерба:

- *социальный ущерб* (Y_c). Этот вид ущерба проявляется в виде гибели людей, вызванной электрическим поражением, или при пожаре из-за повреждения электроустановки, а также потерями трудоспособности, обеспечения услугами здравоохранения, социальными льготами и другими компенсационными затратами. Согласно статистическим данным доля аварий и пожаров в зданиях и

на коммунальных системах жизнеобеспечения составляет почти 50% всех ЧС, произошедших на локальных объектах. Отмеченный социальный ущерб не ограничивается только немедленным воздействием рискообразующего фактора. Необходимо также учитывать и отдалённые последствия негативного проявления электромагнитного поля электроустановки, выражающиеся ухудшением здоровья населения из-за экологического загрязнения среды обитания.

- *материальный ущерб* (Y_m). Объектом материального ущерба, вызванного отказами (авариями) электроустановки, являются производственные, общественные и жилые здания. Готовая продукция или недоотпуск её, убытки, вызванные перерывами электроснабжения, снижения качества электроэнергии, подаваемой потребителю.

Последствия этого вида ущерба могут привести к снижению эффективности объектов энергетики, вызванной нарушением режимов работы электроустановок, преждевременному выбытию основных производственных фондов и мощностей.

- *экологический ущерб* ($Y_э$). Этот вид ущерба обусловлен возникновением пожаров от электроустановок и опасными электромагнитными излучениями и проявляется в виде ухудшения характеристик природных ресурсов, животного и растительного мира и т.д.

Несмотря на имеющуюся условность и нечёткость отдельных компонентов структуры интегрального ущерба, предложенная классификация позволяет изучить многогранность проявления техногенного ущерба и его зависимость от большого числа перечисленных выше факторов. Все это свидетельствует о необходимости одновременного учёта как вероятности возникновения аварий и несчастных случаев в электроустановках, так и издержек и потерь, являющихся следствием проявления этих опасных событий.

Таким образом, угрозы жизнедеятельности человека, сельскохозяйственных животных, отказов и аварий, чрезвычайных ситуаций (пожаров) и др. реализуются в виде опасных техногенных ситуаций, оказывающих поражающее, вредное и деструктивное воздействия, возникающие в системе (Ч-Э-С).

Результатом этих воздействий является изменение объектов и среды, выражающиеся в нарушении их целостности, ухудшении режимов функционирования и т.д. Поэтому следует различать понятие

последствий от техногенных опасностей, носящий обобщённый неэкономический характер, и понятие ущерба, представляющего количественную величину, т. е. экономическую категорию. В контексте сказанного ущерб трактуется как оценённые последствия. [24]

Будем рассматривать интегральный ущерб Y_{Σ} от ОТС, вызванных электроустановками объектов АПК и инфраструктуры сельских поселений, как сумму базовых составляющих:

$$Y_{\Sigma} = Y_{\text{ч}} + Y_{\text{о}} + Y_{\text{с}}, \quad (21)$$

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

$Y_{\text{о}}$ - ущербы объектам техносферы, определяются суммированием от повреждения и разрушения основных фондов инфраструктуры объектов электроэнергетики (электрические сети, электроустановки, технологическое оборудование и т.д.);

$Y_{\text{с}}$ - ущербы окружающей среде определяются суммированием ущербов, включая упущенную выгоду и дополнительные затраты на ликвидацию неблагоприятных последствий для жизнедеятельности человека, животного и растительного мира.

Отметим, что составляющие интегрального ущерба $Y_{\text{ч}}$, $Y_{\text{о}}$ и $Y_{\text{с}}$ выражают соответственно социальный, материальный и экологический виды ущербов.

В свою очередь каждый вид ущерба по классификации можно представить:

- прямой:

$$Y^{\text{П}} = Y'_{\text{ч}} + Y'_{\text{о}} + Y'_{\text{с}}, \quad (22)$$

- косвенный:

$$Y^{\text{К}} = Y''_{\text{ч}} + Y''_{\text{о}} + Y''_{\text{с}}, \quad (23)$$

- полный:

$$Y^{\text{ПОЛ}} = Y'''_{\text{ч}} + Y'''_{\text{о}} + Y'''_{\text{с}}, \quad (24)$$

Введённые индексы (22), (23), (24) позволяют учитывать долю определённого вида ущерба в общей многоуровневой его структуре. Такая структура интегрального ущерба даёт возможность, с одной стороны, учесть все разнообразие последствий ОТС в электроустановках, а с другой - исключить двойной учёт последствий, который может возникнуть, если выбранные виды последствий (ущербов) будут перекрывать друг друга. В этом случае интегральный

ущерб от ОТС может быть получен путём сложения ущербов различных видов.

Рассмотренная структура интегрального ущерба электроустановки позволяет представить многокомпонентные ущербы в виде вектора ущербов, который будет соответствовать i -му состоянию человеко-машинной системы (Ч-Э-С):

$$Y_i = \{[Y^H, Y_C], [Y^H, Y_M], [Y^H, Y_Э], [Y^K, Y_C], [Y^K, Y_M], [Y^K, Y_Э]\}, \quad (25)$$

Учитывая, что универсальная шкала для измерения (оценки) ущерба отсутствует, на практике используется три шкалы:

а) естественная, где применяются натуральные количественные значения величин;

б) экономическая, показатели представляются в денежном выражении;

в) субъективная (качественная) шкала - создаётся в тех случаях, когда отсутствует возможность получения численных значений по естественной шкале.

Для расчёта ущербов от техногенных опасностей в РФ используется действующая законодательная и нормативно-техническая база. Эта база служит основанием для правового регулирования в сфере оценки экономических ущербов от воздействия аварий, чрезвычайных ситуаций и т.д.

При риске, связанном с неблагоприятными условиями труда, нанесения ущерба здоровью, профессиональными заболеваниями, сокращением продолжительности жизни человека и электротравмой, последствия (потери, ущербы) могут быть частично оценены количественно в таких категориях, как простой в работе, расходы на оплату больничных листов, страховые выплаты и т.д.

При риске, связанном с электротравмой с летальным исходом, количественные оценки последствий (ущербов) отсутствуют. Отсутствует также и соответствующая нормативная база.

Концепция стоимости жизни человека в контексте оценки ущерба от электротравматизма с летальным исходом. Вопрос об экономическом подходе к оценке риска жизни и здоровья человека впервые был поставлен В. А. Легасовым при анализе проблемы безопасности ядерной энергетики. Им было введено понятие «стоимость среднестатистической жизни человека» (ССЖЧ). Позднее, были сформулированы основные подходы к управлению

техногенными рисками, в основе которых был положен принцип равновесия между качеством жизни и безопасностью человека. Признавая этот принцип в определённой мере субъективным, нельзя сбрасывать со счетов, что в обществе всегда существовала, и, очевидно, будет существовать дилемма между стремлением улучшить качество жизни и снизить уровень безопасности. Другими словами, увеличение качества жизни в ряде случаев приводит к росту рисков преждевременной смерти, сокращению продолжительности жизни, болезни и т.д. Примерами этому могут быть занятия экстремальными видами спорта, трудовая деятельность на опасных производствах с компенсационными выплатами и др. Отметим, что понятие «качество жизни» является комплексным показателем, составной частью которого, по нашему мнению, должна быть и безопасность. [25] Поэтому здесь уместно сравнивать безопасность не с качеством жизни, а с её продолжительностью. Эти два понятия положительно коррелируют между собой и могут быть количественно оценены. Они не содержат субъективной оценки и могут быть положены в основу целевой функции при проведении оптимизационных мероприятий. Такая целевая функция должна отражать объективные ценности человеческой жизни, которые можно выразить в количественных показателях - продолжительность жизни и безопасность (в терминах теории риска).

Признавая приоритет жизни и здоровья отдельного человека, нельзя игнорировать тот факт, что многочисленные случаи электротравм, гибель людей в ДТП приносят огромные материальные потери обществу, выражающиеся недокладом среднедушевого дохода в ВВП. Возникшее противоречие между абсурдной оценкой жизни индивидуума в денежном выражении и потерями при гибели людей, выраженными монетарно - устраняются, если разграничить два понятия: жизнь индивидуума (конкретного человека) и среднестатистическая жизнь человека (ССЖЧ). Если конкретному человеку грозит реальная опасность погибнуть, то ценность его жизни не должна определяться некой денежной суммой, ибо не существует таких финансовых средств, которыми можно было бы оценить его жизнь. В то же время следует понимать, что далеко не все затраты, направленные на снижение риска, возможны или экономически оправданы. Нельзя требовать снижения риска любыми средствами, как

и невозможно добиться абсолютной безопасности с нулевым риском. Очевидно, должен существовать некоторый предел финансовых средств и материальных ресурсов, выше которых их расходование становится нецелесообразным и в ряде случаев невозможным при определенном уровне развития общества. Вместе с тем общество должно стремиться к установлению высокой ССЖЧ. Необходимость её оценки в денежном эквиваленте вызвана тем, что повышение безопасности во всех сферах жизнедеятельности человека требует выделения адекватных средств на нейтрализацию опасных факторов и минимизацию рисков.

Методические подходы к оценке ССЖЧ. Впервые стоимостный подход к оценке жизни человека был сформулирован в Великобритании в середине XX века и строился на том, что стоимость жизни приравнивалась к стоимости продукции и услуг, недополученных из-за гибели или потери трудоспособности граждан в результате ДТП. Такой подход является утилитарным, поскольку стоимость жизни становится эквивалентной величине «человеческого капитала», определяемого добавленной стоимостью, которую человек производит за всю свою жизнь. Признаем, что профессиональная деятельность, являясь не главной составляющей жизни человека, не может служить мерилom ССЖЧ.

В настоящее время используются объективный и субъективный подходы к оценке ССЖЧ. В основе первого лежит экономическая оценка рисков жизни и здоровья людей. Субъективный подход базируется на том факте, что ценность сохранённой жизни позволяет определить в стоимостном выражении количество средств, которые люди были бы готовы заплатить за уменьшение риска потери жизни или трудоспособности, например, при электротравме. При этом величину ущерба соотносят с реальными экономическими показателями страны.

Согласно социологическим исследованиям компании РОСГОССТРАХ, по мнению респондентов, стоимость желаемой компенсации в связи с гибелью человека в ДТП колеблется в диапазоне 3,4 - 4,3 млн. руб., в то время как в США условная оценка стоимости жизни человека составляет 3 млн. долл. Следствием низкой оценки стоимости жизни российского гражданина является существенное

занижение бюджетных средств, направляемых на реализацию мер по снижению аварийности на дорогах.

Отметим, что при субъективном подходе к оценке ССЖЧ доминирующим фактором является личное восприятие человеком риска его гибели. Согласно работе, в которой была предпринята попытка экспериментальным путём провести ранжирование риска смертельного исхода опасных технологий, было установлено, что испытуемые полагаются (в отличие от экспертов) не на статистические данные, а на свой жизненный опыт и интуицию. Результаты экспериментов показали переоценку опасности технологий с низкой смертностью и недооценку технологий с высокой смертностью.

Ниже приведена таблица основных факторов, влияющих на субъективные представления людей о снижении риска смертности и ССЖЧ. [26]

Анализ данных таблицы 4 показывает, что суждение людей о вероятностях опасных событий и потенциальном ущербе основаны на личном восприятии риска и существенно отличаются от объективных данных.

Люди достаточно субъективно подходят к оценке степени опасности, игнорируя при этом частоту смертельных исходов. Так, при оценке сравнительной опасности ядерной энергетики и бытовых электроприборов, подавляющее большинство считает наиболее опасным ядерную энергетику, хотя показатель смертности от неё значительно ниже, чем от бытовых электроприборов. Отсюда можно сделать вывод, что при ранжировании используемых опасных технологий по степени связанного с ними риска, общество, как правило, руководствуется не объективными показателями смертности, а каким-то другим субъективным критерием. Подтверждением этому выводу является выборочная таблица 4, представляющая коллективное результирующее ранжирование по степени уменьшения опасности и сравнительную оценку согласованности при вынесении суждений о риске.

Таким образом, субъективный подход к оценке риска смертельного исхода и стоимости статистической жизни человека определяются на основании социологических опросов населения. (Здесь под «стоимостью жизни» понимается размер денежного возмещения семье погибшего, который общество считает справедливым.)

Таблица 4 - Суждение людей о вероятностях опасных событий и потенциальном ущербе

Факторы опасности	Субъективные представления людей об опасностях	Лингвистические оценки опасности
Значимость последствий (исходов)	Наиболее значимые последствия, ставящие под угрозу жизнь человека	Очень высокая
Неконтролируемость опасной техногенной ситуации	Отсутствие контроля над развитием события резко снижает готовность людей идти на риск	Высокая
Частота угроз	Люди терпимее к частым и незначительным опасностям, чем к редким чрезвычайным ситуациям с большим числом жертв, даже если суммарные потери в первом случае гораздо выше, чем во втором	Менее высокая
Новизна технологий и оборудования	Общество проявляет большее доверие к старым, хорошо известным технологиям, чем к новым, где отсутствует опыт их использования	Средняя
Добровольность	Возможность свободного выбора при выполнении опасных работ резко снижает восприятие техногенных рисков	Низкая

В таблице 5 на основании литературных источников приведена характеристика объективных подходов (методов) к оценке стоимости среднестатистической жизни человека.

На основании изложенного можно сделать вывод, что в мировом сообществе в настоящее время существуют различные точки зрения, касающиеся оценки стоимости жизни человека. [27]

Таблица 5 - Методы оценки ССЖЧ

Метод оценки ССЖЧ на основе определения:	Характеристика метода
Совокупного пожизненного дохода	Стоимость жизни человека определяется на основании его доходов. Экономический эквивалент ССЖЧ равен отношению среднего душевого денежного годового дохода к средней вероятности смерти в течение года
Среднего ВВП на душу населения	Считается, что преждевременная смерть работающего означает потерю общественной полезности - валового внутреннего продукта на душу населения. Поэтому недополученный ВВП в результате преждевременной смерти человека - есть стоимость его жизни
Актуарных расчетов	Оценка производится на основании среднедушевых доходов и ВВП, исходя из случайного времени наступления смерти. Актуарные расчёты применяются в долгосрочном страховании, т. е. в страховании жизни. Тарифные ставки страхования определяют ССЖЧ
Общественных издержек	ССЖЧ определяется как сумма затрат на образование, здравоохранения, подготовку трудовых ресурсов и иных расходов, необходимых для воспроизводства человеческого капитала
Демографического баланса	ССЖЧ определяется на основе баланса материальных благ, производственных и потребляемых человеком, к некоторому возрасту, т.е. определяется рентабельность возрастной группы населения, её способность накопить средства для воспроизводства будущих поколений

Гуманитарный - господствовавший в СССР, в принципе недостижим.

Экономический, учитывающий только экономическую оценку жизни, приводит к абсурду (безвременная смерть неработающего человека-пенсионера приносит обществу экономический эффект из-за прекращения социальных выплат).

Комплексный, в основе которого лежит существующая за рубежом (в развитых странах) практика социального страхования: экономический эффект от предотвращения преждевременной смерти человека в результате несчастного случая рассчитывается с помощью социальных методик, учитывающих только хозяйственную компоненту человеческой жизни; духовная составляющая оценивается на порядок выше хозяйственной.

В таблице 6 приведена классификация подходов и методов к оценке.

Таблица 6 - Классификация подходов и методов к оценке ССЖЧ.

Подход	Характеристика
Гуманитарный	Постулат бесценности человеческой жизни, предполагает создание системы безопасности с нулевым риском (недостижимая цель)
Экономический	Монетарная оценка риска жизни и здоровья: человек рассматривается как орудие труда (абсурдный вывод)
Комплексный	Система долгосрочного страхования жизни предполагает оценивать ССЖЧ, отделяя хозяйственную составляющую от духовной (люди живут не для того, чтобы производить материальные блага)

Принимая во внимание отсутствие в настоящее время методики расчёта стоимости ССЖЧ и соответствующих нормативов, считаем целесообразным введение качественных (лингвистических) оценок при менеджменте риска электротравмы.

В основе таблицы 2 лежит метод FMEA (Potential Failure Mode Effects Analysis), с помощью которого представляется возможным экспертно определить оптимальный риск на основании баллов вероятности возникновения опасностей и их последствий.

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

8. Алгоритм оценки и анализа интегрального риска электроустановок объекта

В соответствии с концепцией анализа риска в основе обеспечения техногенной безопасности должна лежать методология определения частоты (вероятности) и последствий негативных событий. Сочетание этих событий является достаточным основанием признания факта объективного существования риска опасности электроустановки.

На рисунке 12 представлен алгоритм анализа интегрального риска электроустановок объектов АПК. Данная схема отражает особенности качественного и количественного анализа, целью которых являются:

- прогнозирование опасных событий и обоснование оценок рисков при реализации организационных и технических мероприятий, направленных на их снижение;

- определение уровней допустимых (приемлемых) рисков.

Введённый выше показатель интегрального риска позволяет оценить:

- потенциальный (на стадии проектирования) или фактический (на стадии эксплуатации) вред жизни и здоровью человеку (персоналу, населению);

- экономический эквивалент от техногенных опасных электроустановок объектов отрасли.

Рассмотрим процедуру анализа риска электроустановки.

Этап 1. Обоснование методологии, выбор и описание объекта исследования (системы)

При анализе рисков будем придерживаться концепции трехкомпонентной человеко-машинной системы (Ч-Э-С), характеризующей взаимодействия:

- а) с человеком (социальный фактор),

- б) с электроустановкой (техногенный фактор),

- в) с окружающей средой (экологический фактор).

Подчеркнём, что целями риск-анализа могут быть либо оценка безопасности объекта, либо определение эффективности (количественно) мероприятий по повышению техногенной безопасности. [28] Для определения критериев и уровней приемлемого риска воспользуемся рекомендациями, из которых следует, что

предельно-допустимый уровень техногенного риска должен находиться в диапазоне $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-5}$. Учитывая отсутствие в России законодательного закрепления нормативного значения R_{Σ} , допустимый уровень риска устанавливается на основании, так называемой, экономической целесообразности. Имеется также проблема в недостаточности исходных данных.

№ этапов	Процедуры	Методологический аппарат анализа. Методы моделирования
1	2	3
1. Обоснование методологии, выбор и описание объекта (системы)	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Электроустановка</div> <p style="text-align: center;">Определение целей анализа</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Детерминистический</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Статистический</div>
2. Идентификация опасностей системы	<p>Анализ надежности уязвимости, отказов аварий</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Выделение опасных подсистем</div> <div style="font-size: 20px;">↔</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Выделение опасных воздействий</div> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Вероятностный</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Логико-вероятностный</div>
3. Изучение условий реализации опасностей	<p>Формирование перечня рискообразующих факторов компонентов человеко-машинной системы</p> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; gap: 20px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Ч</div> <div style="font-size: 20px;">↔</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Э</div> <div style="font-size: 20px;">↔</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">С</div> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Метод нечетких множеств</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Качественный анализ</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Диаграмма влияния</div>
4. Получение вероятностных оценок	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Сбор и анализ статистических данных</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Экспертная оценка надежности</div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; margin-top: 10px;">Оценка вероятности возникновения опасных техногенных ситуаций</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Дерево событий</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Дерево отказов</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Сети GERT</div>
5. Анализ последствий	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 5px;">Анализ поражающих факторов</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 5px;">Анализ вредодействующего фактора</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 5px;">Анализ деструктивных факторов</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Оценка ущербов и потерь</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Имитационные модели</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Экспертные системы</div>
6. Оценка риска (критерии)	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; margin-bottom: 5px;">Учет неопределенностей</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Внешние возмущения $Z(t)$</div>	
7. Вычисление интегрального риска	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Определение индивидуального, коллективного и социального R</div>	

Рисунок 12 - Структурная схема анализа риска

В этом случае оценка безопасности объекта может быть проведена с помощью качественных показателей, характеризующих частоту события и меру последствий этого события. В таблице 2 приведена упрощённая шкала базовых бальных лингвистических и численных оценок. Приведённые результаты качественного анализа интегрального риска являются исходной информацией для проведения количественного анализа.

Этап 2. Идентификация техногенных опасностей.

Рассмотрим иницирующие события, которые могут привести к негативным последствиям (аварии, травме, пожару):

1) Подсистема «человек» (свойства, характеризующие «надёжность» человеческого фактора).

2) Подсистема «электроустановка» характеризуется параметрами надёжности и живучести (уязвимости).

3) Подсистема «среда» характеризуется штатными и аварийными нагрузками, оказывающими негативное воздействие на функционирование системы.

На этом этапе выявляется перечень неблагоприятных событий, проявление которых способно нанести вред человеку, основным фондам (материальным объектам) и ухудшить качество окружающей среды (экологическую обстановку). [29]

Применительно к электроустановке иницирующими событиями являются физические процессы старения и износа проводниковых, изоляционных и конструкционных частей (элементов) ЭУ под влияние факторов внешней среды. Общеизвестным, объясняющим физико-химические механизмы старения и износа электрооборудования конструкционных материалов, является кинетический подход, в основе которого лежит признание того факта, что разрушение, например, электропроводки, не может произойти мгновенно, а представляет собой процесс, протекающий во времени. Длительность этого процесса в конечном счёте определяется временными характеристиками отдельных микроэлементов, ограничивающих своим движением устойчивость и надёжность в целом всей электропроводки по отношению к различным внешним нагрузкам.

Изучение физических закономерностей накопления повреждений при учете различных факторов среды позволили провести

систематизацию основных дефектов электроустановки, приводящих к отказу (таблица 7).

Таблица 7 - Систематизация основных дефектов электроустановки

Эксплуатационные дефекты электроустановки	
Проводящие и конструкционные элементы	Изоляционные элементы
<ul style="list-style-type: none"> - Окисление - Усталость металла - Коррозия металла - Нагрев токоведущих элементов - Нагрев контактных соединений - Образование свищей и трещин - Частичные микроразрывы 	<ul style="list-style-type: none"> - Электрическое и тепловое старение диэлектрика - Снижение поверхностного и объемного сопротивлений - Повышение диэлектрических потерь - Эрозийный износ - Образование токопроводящих мостиков <ul style="list-style-type: none"> - Кавитация - Увлажнение - Искрообразование - Облучение - Пробой (электрический, тепловой)

К иницирующим факторам среды (производственные сельскохозяйственные объекты) отнесём:

- температуру,
- относительную влажность воздуха,
- наличие агрессивной среды (химически активных загрязнителей),
- резкие колебания параметров микроклимата производственных помещений.

Для оценки технического состояния ЭУ с целью последующего определения её остаточного ресурса на данной стадии эксплуатации необходимо знание временных характеристик наступления заданных предельных состояний элементов электроустановки.

Этап 3. Для изучения условий реализации техногенных опасностей формируется перечень рискообразующих факторов компонентов человеко-машинной системы с учетом следующих информационных блоков:

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

- 1) отказы электроустановки;
- 2) перерывы электроснабжения потребителей;
- 3) электротравматизм людей;
- 4) пожары от электроустановок;
- 5) потери электроэнергии;
- 6) ухудшение показателей качества электроэнергии;
- 7) электропоражение и электропатология сельскохозяйственных животных.

Этап 4. Получение вероятностных оценок (частот) опасных событий (таблица 8) относится к первому шагу анализа риска. Частота возникновения ОТС в электроустановке. может быть задана как количественно (в виде точечных или интервальных оценок), так и качественно (с помощью лингвистических переменных).

Для определения частоты возникновения опасного события в ЭУ могут быть использованы следующие подходы:

1. Сбор и анализ статистических данных (отказы, аварии, несчастные случаи и т.д.), накопленных за определённый период эксплуатации объектов.

2. Прогнозирование частоты ОТС с использованием анализа деревьев событий и отказов.

Этап 5. Анализ последствий (исходов), направлен на оценку ущербов (потерь), вызванных:

- простоем технологического оборудования и недоотпуском продукции из-за перерывов электроснабжения потребителей;

- компенсационными издержками вследствие возникших аварий и отказов электроустановок;

- электротравматизмом людей с летальным или тяжёлым исходом (потерей трудоспособности);

- потерей молокоотдачи у коров и привесов у животных на откорме, вызванных электропатологией;

- потерей электроэнергии в сетях из-за несимметрии нагрузок и наличия высших гармоник напряжения и тока.

Представляется целесообразным оценку общего ущерба проводить в денежном эквиваленте, используя при этом понятие «стоимости среднестатистической жизни человека» (ССЖЧ).

Таблица 8 - Типовые уровни частот возникновения ОТС

Уровень частоты	Частота событий, f , год ⁻¹	Описание
Частое	$f > 10^{-3}$	Вероятность частого возникновения. Постоянное наличие опасности.
Вероятное	$5 \cdot 10^{-4} \leq f < 10^{-3}$	Неоднократное возникновение. Ожидается частое возникновение опасного события.
Случайное	$10^{-4} \leq f < 5 \cdot 10^{-4}$	Вероятность неоднократного возникновения. Ожидается неоднократное возникновение опасного события.
Редкое	$10^{-5} \leq f < 10^{-4}$	Вероятность того, что событие будет иногда возникать на протяжении жизненного цикла объекта. Обоснованное ожидание возникновения опасного события.
Крайне редкое	$10^{-6} \leq f < 10^{-5}$	Возникновение события маловероятно, но возможно. Можно предположить, что опасная ситуация может возникнуть в исключительном случае.
Маловероятное	$f \leq 10^{-6}$	Вероятность возникновения крайне маловероятна. Можно предположить, что опасное событие не возникнет.

Это понятие, как было показано выше, является достаточно условным, т.к. жизнь человека не является рыночным товаром, однако материальные потери, связанные с гибелью людей, объективно существуют, поэтому эти потери могут быть монетарно оценены. [30]

Этап 6. Оценка риска (критерии) включает в себя анализ частот (или вероятностей), анализ последствий, определение условия риска и его составляющих, определение уровня риска и его сопоставление с нормативным (приемлемым) значением. При этом критерии приемлемого риска могут задаваться нормативно-технической документацией.

В общем случае приемлемый риск сочетает в себе технические, социальные и экологические аспекты и представляет некоторый компромисс между стремлением повысить уровень техногенной безопасности, например, электроустановки, и экономическими возможностями его достижения.

В настоящее время принято считать, что техногенный риск должен находиться в пределах $1...2 \cdot 10^{-6}$ (смертельных случаев чел⁻¹·год⁻¹), а величина $1 \cdot 10^{-6}$ является максимально приемлемым уровнем индивидуального риска.

При оценивании интегрального риска электроустановки полученную расчётную величину R_{Σ} соотносят с допустимым уровнем $R_{доп}$.

Допустимый уровень риска определяется критериями приемлемого риска. Для определения R_{Σ} , как известно, необходимы математические модели, адекватные исследуемым объектам, и достоверные статистические данные.

В случае невозможности получения количественных показателей риска могут быть использованы качественные методы, основанные на семантическом описании следующих компонентов опасного события:

- возможности его наступления (вероятности);
- длительности времени воздействия опасного фактора на объект (субъект);
- последствия, характеризуемые мерой тяжести события.

Каждую категорию можно описать с помощью лингвистической оценки и присвоить им соответствующие рейтинги (таблицы 9, 10, 11).

Сочетая при этом семантические модели, можно построить векторную матрицу качественно-количественных характеристик интегрального риска опасности электроустановок.

Анализ таблиц 9, 10 и 11, характеризующих отмеченные компоненты риска, позволяют найти диапазон измерений числовых его оценок.

Рассмотрим интегральный риск ЭУ в виде функционала трёх лингвистических переменных, расположенных интервально соответственно по осям X, Y, Z

$$R_{\Sigma} = F[X, Y, Z], \quad (25)$$

Таблица 9 - Лингвистическая оценка возможности (вероятности) опасного события X

Степень; возможности (реализуемости)	Описание реализуемости	Числовая оценка	Уровень реализуемости (рейтинг)
Практически невозможно	Событие не произойдёт за время существования объекта (системы)	~ 0,0	1
Маловероятно	Событие может произойти в исключительных условиях (крайне редко)	0,3	2
Вероятно	Событие может произойти один раз на протяжении существования объекта	0,5	3
Наиболее возможно	Событие будет происходить в большинстве инициирующих обстоятельств	0,7	4
Почти достоверно	Событие будет происходить при всех инициирующих обстоятельствах	~ 1,0	5

Таблица 10 - Лингвистическая оценка длительности воздействия опасного события (Y)

Степень длительности	Описание меры длительности	Числовая оценка	Уровень длительности времени (рейтинг)
Мгновенно	Длительность времени воздействия ничтожно мала	0,0	1
Быстро	Импульсное (<0,5 периода) воздействие на объект электрического тока	0,3	2

Степень длительности	Описание меры длительности	Числовая оценка	Уровень длительности времени (рейтинг)
Умеренно	Краткосрочное (до 1 с) воздействие электрического тока на объект	0,5	3
Длительно	Время воздействия электрического тока составляет порядка 1 мин (кумулятивное накопление энергии в ЭУ)	0,7	4
Долго	Время воздействия электрического тока превышает 5 мин (происходит неконтролируемое высвобождение электроэнергии и её эскалация в окружающую среду)	1,0	5

Таблица 11 - Лингвистическая оценка последствий опасного события (Z)

Степень последствий (тяжести)	Описание последствий	Числовая оценка	Уровень последствий (рейтинг)
Очень низкая	Старение и износ в допустимых пределах, отсутствие повреждений	~0,0	1
Низкая	Незначительные нарушения функциональных характеристик объекта	0,3	2
Умеренная	Отказы, нарушения функций объекта, травмы с временной потерей трудоспособности	0,5	3

Степень последствий (тяжести)	Описание последствий	Числовая оценка	Уровень последствий (рейтинг)
Значительная	Аварии, несчастные случаи с потерей трудоспособности	0,7	4
Высокая	Смертельные случаи (электротравмы и в результате пожара, разрушения, ликвидация последствий требует значительных ресурсов)	~1,0	5

Тогда отрезки \bar{X}, \bar{Y} и \bar{Z} , могут характеризовать в количественном выражении возможность наступления опасного события, его длительность и последствия. Для оценки интегрального риска R_{Σ} введём пятибалльную лингвистическую шкалу (таблица 12) с интервальными значениями согласно нормативно - технической документации. [31]

Пренебрежительный риск в расчёт не принимается, человеко-машинная система функционирует эффективно.

Приемлемый и допустимый риски обусловлены недолговременными и малозначимыми нарушениями штатных режимов работы электроустановки. Неприемлемый и катастрофический риски соответствуют угрозам с опасными последствиями: авариями, гибелью людей, пожарами. [32]

Таблица 12 - Лингвистическая шкала оценки интегрального риска

Вид R_{Σ}	Характеристика риска
Очень малый	Пренебрежительный - [$<10^{-6}$]
Малый	Приемлемый (нормативный) - [$1 \cdot 10^{-6}$]
Средний	Допустимый - [$1 \cdot (10^{-4} - 10^{-5})$]
Высокий	Неприемлемый - [$1 \cdot (10^{-2} - 10^{-3})$]
Очень высокий	Катастрофический - [$<10^{-2}$]

На рисунке 13 приведена структурная схема аналитической сети для оценки интегрированного риска человеко-машинной системы (Ч-Э-С).

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

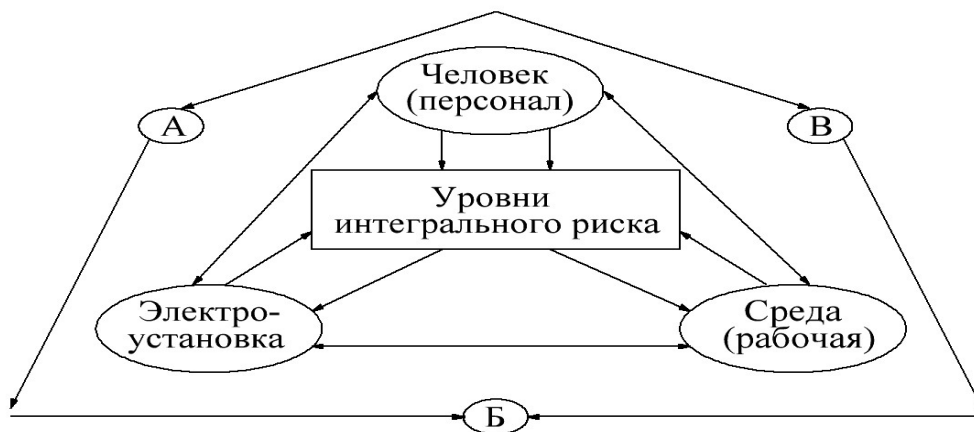


Рисунок 13 – Структурная схема аналитической сети для оценки интегрального риска человеко-машинной системы (Ч-Э-С)

Матрица интегрального риска электроустановок (рисунок 13) строится следующим образом:

- по оси X отсчитываются вероятности (частоты) возникновения ОТС, представленные в виде шкалы в соответствии с принятыми лингвистическими оценками (таблица 9);

- по оси Y отсчитываются длительности воздействия опасного (поражающего, вредодействующего) фактора, представленные в виде шкалы в соответствии с принятыми лингвистическими оценками (таблица 10);

- по оси Z отсчитываются размеры последствий ОТС, представленные в виде шкалы в соответствии с принятыми лингвистическими оценками (таблица 11).

Введение трёхмерной матрицы позволяет определить степень опасности и исхода аварии, электротравмы, пожара. Так, согласно критериям электробезопасности, тяжесть последствий попадания человека под напряжение зависит не только от его величины, но и от времени воздействия. При этом исход электротравмы может иметь три последствия:

- а) лёгкую степень, вызывающую временную потерю трудоспособности;

- б) среднюю степень, приводящую к инвалидности (утрате трудоспособности);

- в) тяжёлую степень - летальному исходу.

Аналогичным образом можно оценить тяжесть последствий, например, аварии электроустановки, и эффективность средств РЗА.

МОНОГРАФИЯ

Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.

Таким образом, рассмотренные показатели риска электроустановки характеризуют не только наличие источников и соответствующих предпосылок появления техногенных происшествий, но также меру возможности возникновения опасности, длительности её существования и возможных последствий (ущербов и потерь). Отметим, что качественный анализ риска позволяет определить рискообразующие факторы и вскрыть причины, обуславливающие появления техногенных опасностей в электроустановках. [33] Качественный анализ позволяет провести идентификацию всех возможных рисков, их ранжирование по экспертным оценкам, выделив из них наиболее значимые, которые будут являться объектом дальнейшего количественного анализа. Последний предполагает численное определение отдельных компонентов риска и является основой для проведения прогнозирования и оптимизации интегрального риска R_{Σ} .

Седьмой этап. Процедура вычисления интегрального риска сводится к определению его составляющих:

1) индивидуального, которому подвергается человек, получивший электротравму (оценивается вероятностью попадания человека под напряжение или прогнозируемой частотой смертности или инвалидности);

2) коллективного, определяемого ожидаемым числом смертельно травмированных в результате возникновения техногенной опасности за определённый период времени;

3) социального, характеризующегося отношением числа погибших от электротравм к определённому множеству людей.

Как было отмечено выше, все риски могут быть определены статистическим либо вероятностным (с помощью математического моделирования) методом. Последующие этапы, связанные с сопоставлением полученных расчётных значений интегрального риска с приемлемым, установленным соответствующими нормативами, наглядно иллюстрируются на рисунке 14.

Заключительным этапом анализа является так называемая обработка риска, описываемая процессом выбора и выполнения мероприятий для изменения риска (уменьшение значения или его предотвращение).

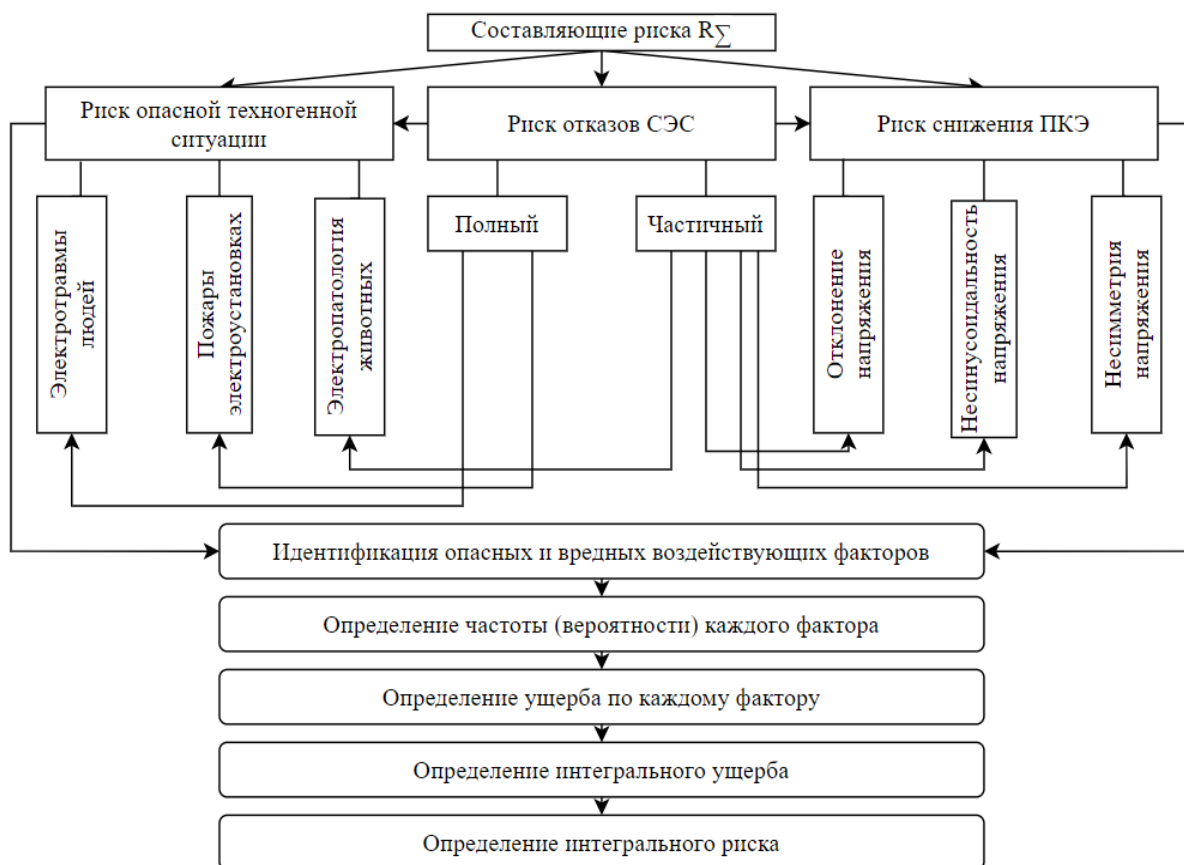


Рисунок 14 - Методология оценки интегрального риска ЭУ

9. Методы моделирования опасных антропогенных ситуаций в электроустановках

Неуклонный рост аварий, электротравматизма и пожаров в системах электроснабжения (включая и технологическое электрооборудование) обусловлен многими причинами, в том числе несовершенством научно-методического обеспечения в области техногенной безопасности электроустановок (ЭУ) потребителей. Отсутствует единая методология, базирующаяся на унифицированной трактовке риска ЭУ, позволяющая проводить комплексный учёт факторов возникновения и развития опасностей различной природы человеко-машинной системы (Ч-Э-С). Имеются также объективные трудности при принятии решений по управлению техногенными рисками. Эти трудности вызваны следующими причинами:

1) Низкой структурированностью, неопределённостью, физической неоднородностью компонентов человеко-машинной системы.

2) Наличием многочисленных ограничений технологического, нормативного и экономического характера.

3) Иницирующими предпосылками, приводящими к возникновению опасных техногенных ситуаций (ОТС). К основным таким предпосылкам следует отнести:

а) ошибки человека (персонал, население) - человеческий фактор;
б) отказы системы электроснабжения и электрооборудования - технологический фактор;

в) негативные (сверхнормативные) воздействия факторов среды (С).

4) Недостаточностью исходных данных и отсутствием точного (удовлетворительного) описания возникновения и развития аварийных процессов, что делает невозможным принятия адекватных оценок. Неопределённость информации вызывается состоянием среды, обусловленной случайностью. Нечеткость и неясность является следствием субъективности процессов мышления человека и многообразия семантики и структуры естественного языка.

В этой связи представляется перспективным оценивать исходную информацию, имеющую неясную, неопределённую и вероятностную природу, на основе использования логико-лингвистического моделирования. [34] Такая оценка представления нечёткой информации является наиболее приемлемой, т.к. даёт возможность в удобной форме формализовать знания экспертов, выраженные в семантической форме.

Как было отмечено в предыдущих разделах, функционирование человеко- машинной системы (Ч-Э-С) в реальных производственных условиях АПК представляет собой сложный процесс, требующий постоянного контроля электротехнического персонала для поддержания нормативных режимов и параметров технологического оборудования. В процессе этого контроля человек принимает различные решения, правильность и эффективность которых можно оценивать только по конечному результату, т.е. по показателям, характеризующим надёжность, безопасность и экономичность функционирования рассматриваемой ЧМС. В этой связи возникает

задача изучения основных закономерностей взаимодействия человека с электроустановкой и проведения системных исследований. Эффективность таких эргатических систем опирается на концепцию целостности в условиях действия внешних возмущений, стремящихся эту целостность нарушить. Эти возмущающие воздействия носят стохастический характер, заранее не известны и не могут быть определены в реальных производственных условиях. Поэтому решение такой задачи может быть получено в рамках системного анализа и синтеза на основе имитационного моделирования ЧМС. Обоснованность проведения системных исследований безопасности электроустановок (рисунки 15 и 16) подтверждается следующими свойствами рассматриваемого комплекса (Ч-Э-С):

- многоцелевым характером;
- многоступенчатой иерархической структурой;

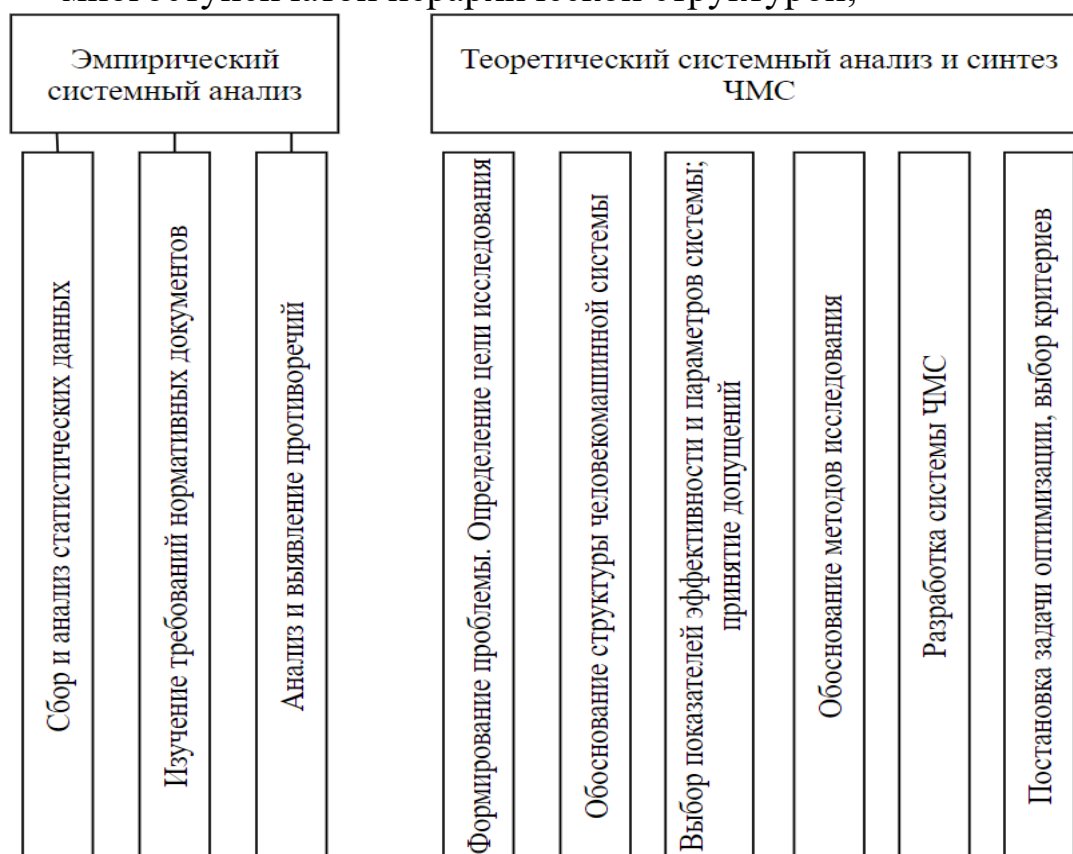


Рисунок 15 – Системное исследование безопасности электроустановок

- случайным характером функционирования компонентов и их взаимодействием с факторами внешней и внутренней среды;

- динамической изменчивостью к воздействиям различных факторов;
- функционально - структурной уникальностью;
- многокритериальностью оценки эффективности;
- низкой структурированностью и физической неоднородностью компонентов и элементов системы;
- многообразием исследования;
- дискретностью состояния;
- неопределённостью;
- диссипативностью.

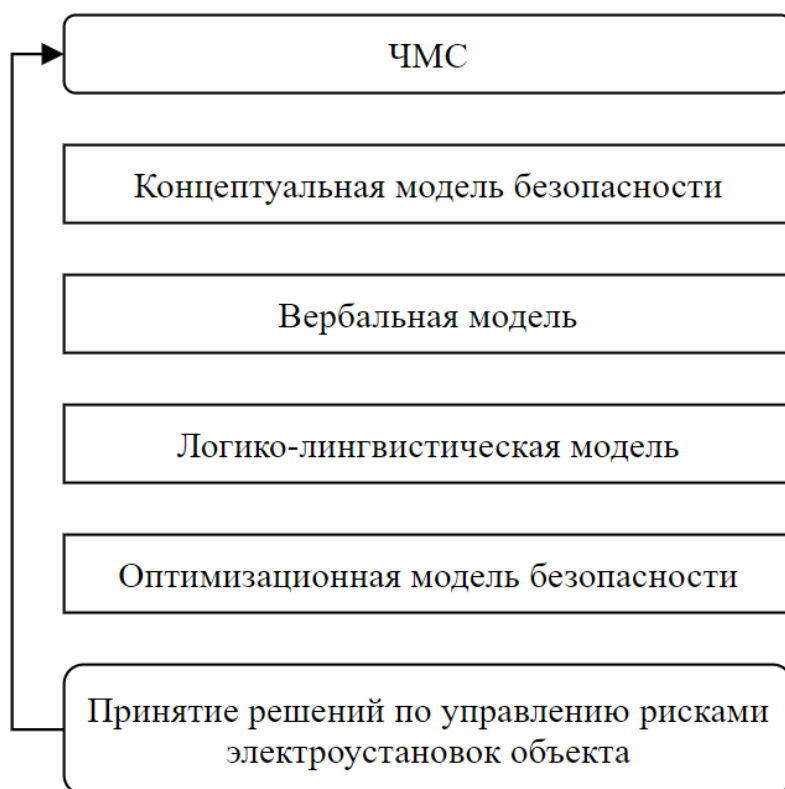


Рисунок 16 - Структура системного анализа и синтеза ЧМС (Ч-Э-С)

Многоцелевой характер (Ч-Э-С) определяется функциональными показателями системы, направленными на обеспечение заданного уровня интегрального риска техногенной безопасности электроустановки. [35] Компоненты R_{Σ} как отмечалось выше, представляют собой частные риски, вызванные:

- отказами элементов системы электроснабжения объекта, электрооборудования, средств электрической защиты и противоаварийной автоматики;

МОНОГРАФИЯ

Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.

- технологическими авариями электроустановок и предаварийными режимами;
- перерывами электроснабжения потребителей, приводящих к простоям технологического оборудования;
- электрическими потерями в сетях и электроприемниках, вызванные нарушениями требований нормативных документов (ПУЭ, СНиП) и проектного задания;
- электропатологией сельскохозяйственных животных, приводящей к снижению продукции (надоев коров и привесов животных, находящихся на откорме).

Многоступенчатая иерархическая структура (Ч-Э-С) представляет неоднородный 3-4-х ступенчатый состав (рисунок 17).

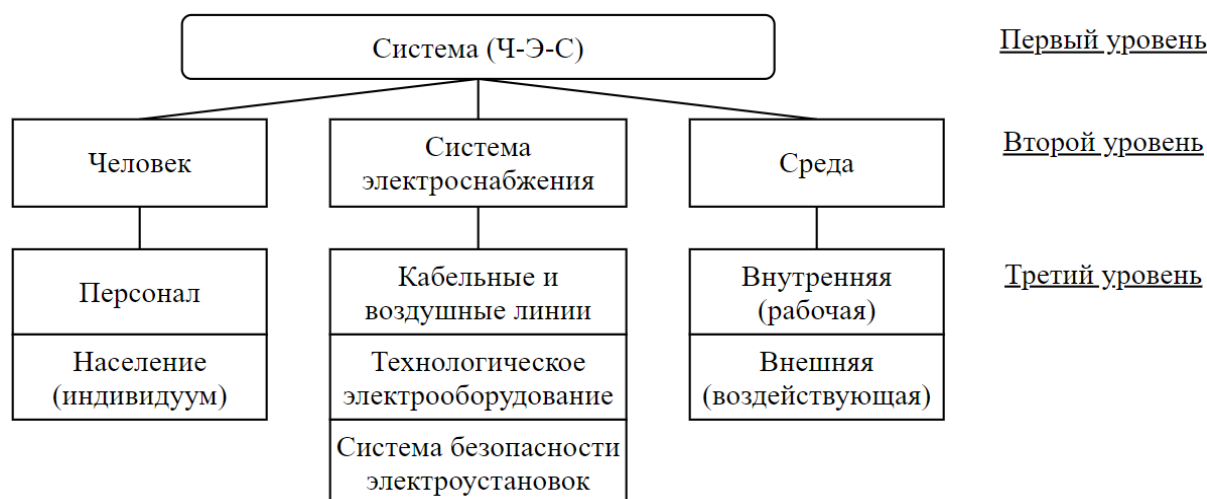


Рисунок 17 - Иерархия структуры системы

Представленная структура является весьма условной: второй и третий уровни интерпретируются как компоненты и подкомпоненты. Появление более низших уровней иерархии системы определяется декомпозицией, т.е. системным анализом, вызванным практической потребностью или теоретической целесообразностью. Декомпозиция или искусственное расчленение рассматриваемой нами сложной системы на составные части позволяет установить отдельные признаки реального объекта как целостного образования и свойств его частей как самостоятельных предметов для изучения связей между ними. Таким образом, основной задачей системного анализа является мысленное расчленение сложного объекта (целого) для выявления его

наиболее существенных частей - компонентов и описание его свойств и существенных связей.

Однако, следует отметить, что расчленение системы (Ч-Э-С) на отдельные части приводит к утрате существенных её свойств. Поэтому за системным анализом следует агрегирование (укрупнение) её элементов, т.е. системный анализ.

Случайный характер функционирования компонентов системы (Ч-Э-С). Любые инициирующие события являются типичными, случайными, зависящими от множества также случайных факторов, обусловленных наличием связей между компонентами рассматриваемой системы. Поэтому показатели, характеризующие эффективность функционирования и соответствующие критерии, также являются вероятностными, и существующая практика моделирования и оптимизации систем безопасности широко использует их.

Динамические свойства системы (Ч-Э-С) проявляются под влиянием различных случайных факторов внешней среды и взаимосвязей между компонентами, например, "человек - электроустановка".

Функционально-структурная уникальность модели (Ч-Э-С) состоит в том, что, несмотря на то, что по своим свойствам она принадлежит к классу человеко-машинных систем, которые описывают сложные производственные объекты с квалифицированным электротехническим персоналом, рассматриваемая нами модель обладает, в определённом смысле, некоторой уникальностью. Эта уникальность характеризуется целью и задачами исследования, рассмотренным перечнем техногенных опасностей, рисками и видами неопределённости, низкой степенью "надёжности" человеческого фактора (практически всё сельское население страны принимает участие в обслуживании электрифицированных машин и механизмов, ручного электроинструмента). Ввиду изложенного можно сделать вывод, что аналоги системы (Ч-Э-С) практически отсутствуют.

Многокритериальная оценка эффективности обуславливается наличием многокомпонентности и многофункциональностью системы (Ч-Э-С). Поэтому каждый компонент может быть характеризован своим частным критерием. Совокупность частных критериев

объединяется в соответствующий системный критерий, характеризующий в целом систему. Последний может быть сведён к некоторому обобщённому показателю.

Низкая структурированность и физическая неоднородность компонентов системы (Ч-Э-С), с одной стороны, создают проблему поиска единой размерности для интегрального показателя эффективности, а с другой, являясь дискретной открытой гетерогенной электротехнической системой, обладает свойством непрерывного рассеивания части своей свободной энергии в тепло, что позволяет системе самонастраиваться, тем самым, повышать свойство ее живучести. [36]

Многомодельность исследования системы (Ч-Э-С) предполагает использование различных методов моделирования для решения следующих основных задач:

- изучения реального объекта, его структуры и свойств, установление закономерности функционирования;
- исследование механизмов управления объектом и его функционирования, в том числе определение оптимальных управляющих воздействий при заданных целях и критериях;
- прогнозирование протекания техногенных процессов в человеко-машинной системе.

Отметим также, что рассматриваемая система не может быть изучена непосредственно опытным путём в силу опасности и быстротечности протекания процессов (например, электропоражение человека). По этим причинам, проведению сложных и дорогостоящих экспериментов, на наш взгляд, должно быть противопоставлено создание и исследование различных моделей, в том числе проведение машинных экспериментов, с помощью которых можно установить наиболее существенные факторы и свойства реального объекта. Поэтому при изучении системы (Ч-Э-С) вместо методов физического (натурного) и аналогового моделирования предпочтение следует отдать математическому моделированию, при котором описание объекта - оригинала осуществляется на языке математики, используя при этом различные знаковые формы.

Дискретность системы (Ч-Э-С), как об этом было сказано выше, определяется совокупностью рассмотренных устойчивых состояний, стабильность которых проявляется в относительной неизменности

структуры системы и интегральных её показателей. Эта совокупность определяет фазовое пространство или пространство состояний.

Неопределённость системы (Ч-Э-С) проявляется либо в вероятностной природе, когда неизвестные факторы статистически устойчивы и описываются методами теории вероятностей, либо в отсутствии статистической устойчивости связей между компонентами системы и средой, либо в неясности целей и ограничений, либо в неизвестности лицу, принимающему решение, критерия оптимизации. Неопределённость также может проявляться, когда параметры не могут быть заданы в виде точечных оценок, а для их описания используются интервальные модели, в которых интервалы оценок задаются граничными значениями (наименьшим и наибольшим из возможных). Полная неопределённость параметров оперирует нечётными, размытыми и неоднородными величинами. Нечётность может быть устранена путём использования нечётких алгоритмов логического вывода относительно конечных результатов моделирования.

Диссипативность системы (Ч-Э-С) задаётся функцией рассеяния R (положительным числом), характеризующей электрическую энергию, рассеиваемую системой, вследствие электрического сопротивления. Диссипативные силы ведут к асимптотической устойчивости системы.

Модель системы в самом общем виде, представленная на рисунке 18, включает в себя: компонент «человек» - электротехнический персонал в условиях производства или население, обслуживающее «бытовую электротехнику»; компонент «электроустановка» - связанный с технологическими процессами, сопровождающимися передачей, распределением и потреблением электроэнергии; компонент "среда" - область рабочего пространства, в которой взаимодействует человек с технологическим оборудованием, а также и внешняя среда - то, что не входит в структуру системы, но может опосредованно негативно или позитивно влиять на процесс её функционирования. [37]

В модели приняты следующие векторные обозначения: - $X(t)$ - входные воздействия на рассматриваемую систему; $Y(t)$ - выходное воздействие системы на внешнюю среду; $S(t)$ - состояние системы в определённый интервал времени. При этом безопасность системы (Ч-Э-С) будем рассматривать как свойство сохранять такое состояние при

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

её функционировании, при котором с достаточно высокой вероятностью исключаются негативные события, а ущерб не превышает допустимого уровня. Другими словами, обеспечение техногенной безопасности можно интерпретировать как стремление к условию инвариантности (или невосприимчивости) системы к возмущающим воздействиям со стороны рабочей или внешней среды и человеческого фактора, а также невосприимчивость к незначительным параметрическим изменениям электроустановок в процессе эксплуатации.

Представим имитационную модель функционирования ЧМС в виде обобщённого выражения:

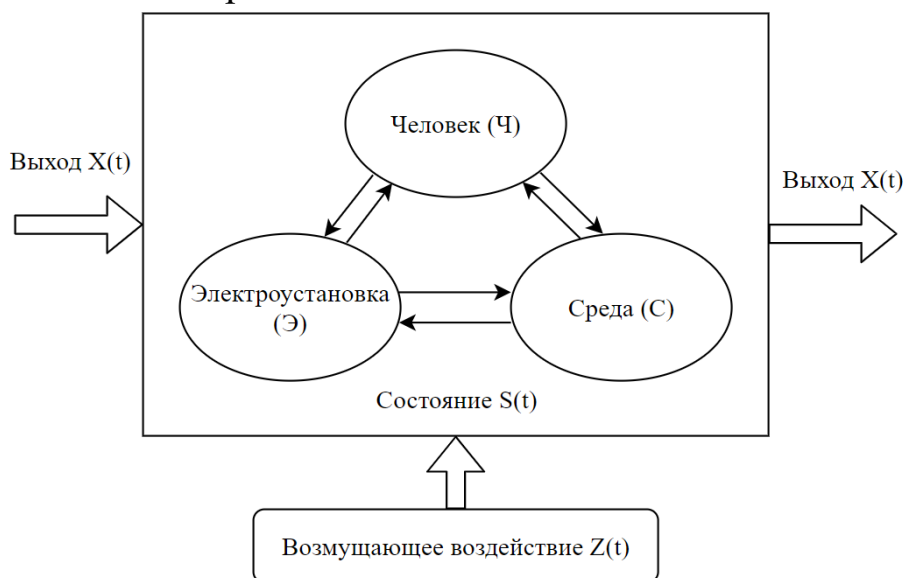


Рисунок 18 – Модель системы (Ч-Э-С)

$$M = \{X, Y, Z, S, T, q, h\}, \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} X &= (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ Y &= (y_1, y_2, \dots, y_m) \\ Z &= (z_1, z_2, \dots, z_p) \end{aligned} \right\} - \text{пространства входных, выходных и}$$

возмущающих воздействий.

Множество $S = (s_1, s_2, \dots, s_k)$ - пространство состояний системы времени $t \in T$;

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

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

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

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

Состояние системы можно оценивать в виде динамического равновесия, при котором интегральные показатели находятся в гомеостазисе. Такое состояние целевых систем (с заданной целью) обуславливается стремлением их к устойчивости. Поскольку диапазон внешних воздействий на систему не может быть неограниченным, поэтому и количество (возмущений) состояний также должно быть достаточно ограниченным. Причём, ограничение этих состояний определяется соотношением между энергией внешнего возмущения и собственной энергоёмкостью системы. На наш взгляд, возможно выделить следующие наиболее характерные состояния системы с разным уровнем воздействия факторов среды:

- низким - не превышающий пороговых значений энергии (система находится в состоянии гомеостазиса);

- допустимым - когда внешняя энергия незначительно превышает пороговое значение, однако, накопление этой энергии не происходит, и она уменьшается в результате рассеяния или преобразования в тепловую энергию; возмущение проявляется в виде незначительных колебаний своих интегральных показателей, и система возвращается в состояние равновесия;

- опасным - приводящим систему к кризисному режиму функционирования. Под кризисом системы (Ч-Э-С) будем понимать процесс её адаптации к изменившимся внешним и внутренним условиям при сохранении её системных свойств при незначительных ущербах;

- критическим - приводящим к состоянию катастрофы, которое сопровождается значительным изменением интегральных показателей

системы из-за радикальной перестройки её структуры и морфологии. Катастрофическое состояние системы вызывает значительные аварии, человеческие жертвы и ухудшение экологической обстановки в результате пожаров;

- чрезвычайным - приводящим к полному разрушению системы и прекращению её существования (состояние катаклизма).

Обобщая изложенное, проведём классификацию состояний компонентов рассматриваемой человеко-машинной системы (рисунок 19):

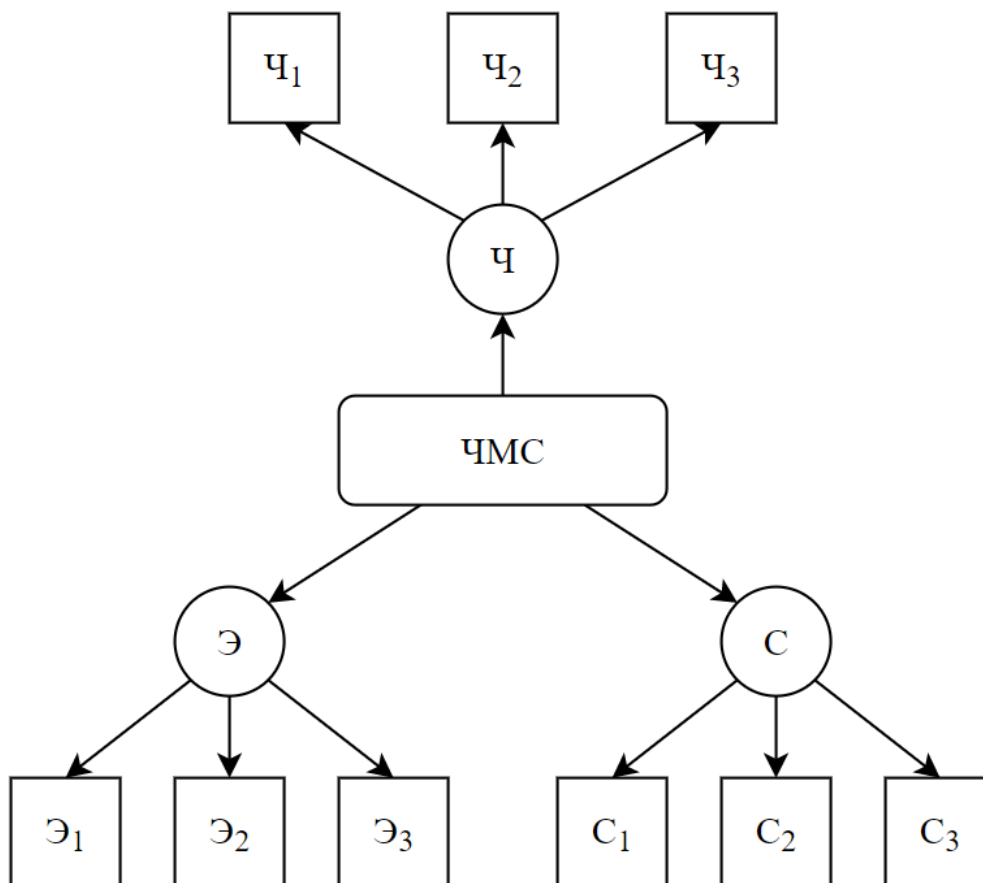


Рисунок 19 - Классификация состояний компонентов системы (Ч-Э-С)

1) Компонент «Человек» характеризуется следующими эргатическими свойствами (состояниями), отражающими результат деятельности оператора (персонала):

Ч₁ - правильные (безошибочные) действия;

Ч₂ - неопределенные;

Ч₃ - неправильные - отказ эргатического элемента, заключающийся в потере его работоспособности или неправильном функционировании. (Работоспособность здесь - свойство человека - оператора, определяемое состоянием физиологических и психических функций и характеризующее его способность выполнять определённую задачу в течение требуемого интервала времени).

2) Компонент «Электроустановка» будем характеризовать следующими состояниями:

Э₁ - нормальное (рабочее);

Э₂ - функциональный отказ, вызванный старением (износом), заключающийся в нарушении правильности функционирования электроустановки при условии сохранения ею работоспособности;

Э₃ - неработоспособное, интерпретируемое как структурный отказ.

3) Компонент «Среда» будем описывать как:

С₁ - комфортное, характеризуемое параметрами, не превышающими нормативное значение;

С₂ - допустимое;

С₃ - сверхнормативное (негативное).

В целом, условия функционирования рассматриваемой человеко-машинной системы можно дифференцировать на:

- нормальные;

- экстремальные (допускаемые);

- аварийные.

Введём понятие вектора состояний функционирования ЧМС:

$$\bar{W} = [W_1, \dots, W_i, \dots, W_n], \quad (27)$$

характеризующий пространство состояний W_i , как результат взаимодействия компонентов человеко-машинной системы. Эти состояния, формируемые путём сочетания совокупностей [Ч₁, Ч₂, Ч₃], [Э₁, Э₂, Э₃] и [С₁, С₂, С₃], описывают развитие иницирующих событий, критических и опасных ситуаций, последующего возникновения отказов, аварий и т.д.

Рассматриваемая модель, как уже было отмечено выше, обладает системными свойствами (иерархией структуры, стохастичностью, множеством состояний и т.д.). Причём, каждый компонент системы является источником техногенной опасности и вносит свой «вклад» в формирование иницирующих событий и развитие аварий и

электротравматизма. Эффективность функционирования такой системы может быть описана с помощью некоторого комплексного показателя, характеризующего меру качества функционирования изучаемого объекта. Другими словами, эффективность системы (Ч-Э-С) представляет собой количественный показатель, отражающий её свойства, направленные для реализации заданных функций. С учётом изложенного общее выражение комплексного (обобщённого) показателя эффективности может быть представлено:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_H + \mathcal{E}_B + \mathcal{E}_{ЭР} + \mathcal{E}_{ЭК}, \quad (28)$$

где \mathcal{E}_H , \mathcal{E}_B , $\mathcal{E}_{ЭР}$ и $\mathcal{E}_{ЭК}$ - соответственно показатели надёжности, безопасности, эргономичности и экономичности.

Перечисленные показатели взаимосвязаны между собой и каждый из них дополняют друг друга. Эти показатели, присущие сложным человеко-машинным системам, в частности, модели (Ч-Э-С), обладают синергетическим эффектом, когда при объединении отдельных компонентов (человек, электроустановка, среда) в единое целое возникает новое свойство эмерджентности. Очевидно, что если рассматриваемая нами система обладает синергетическим эффектом, то можно полагать, что показатели, характеризующие эту систему, также обладают этим же эффектом. Поэтому эти показатели (28), в конечном счёте, должны рассматриваться не только не раздельно друг от друга, но и совместно.

Рассмотрим составляющие показателя \mathcal{E}_{Σ} .

Надёжность. При рассмотрении человеко-машинной системы выделим понятие структурной и функциональной надёжности. Под структурной будем понимать надёжность безотказной работы компонентов и элементов (СЭС, ЭУ, СБЭ) человеко-машинной системы. Этот вид надёжности обуславливается составом и взаимосвязями элементов, в группу его показателей входят:

- вероятность безотказной работы;
- вероятность отказа;
- параметр потока отказов;
- наработка до отказа с заданной вероятностью её не превышения,

т.е. единичные показатели надёжности системы, состоящие из восстанавливаемых элементов.

В расчётах структурной надёжности можно использовать простые вероятностные модели, основанные на средних вероятностях

состояния элементов: например, потока отказов λ (при простейшем пуассоновском распределении), т.е. средним числом отказов в единицу времени (год), отнесённым к одному элементу. (Например, для СЭС параметр потока отказов следует относить на 1 км линии, 1/(км·год)). Применение усреднённых структурных показателей надёжности при выполнении проектных работ обеспечивает необходимую точность (на продолжительных интервалах, когда время безотказной работы во много раз больше времени восстановления элементов).

Функциональная надёжность СЭС, ЭУ и СБЭ в отличие от структурной обусловлена режимными ограничениями. Если структурная надёжность достаточно полно характеризуется понятием полного отказа (т.е. состоянием неработоспособности), то функциональную надёжность можно описывать посредством анализа режимов работы ЭУ (нормального, аварийного и послеаварийного). Причём, здесь делаются допущения, что все её режимы (состояния) являются рабочими; в отличии от нормального - аварийное и послеаварийное состояния находятся на более низком уровне функционирования. Поэтому для описания функциональной надёжности компонентов и элементов системы может быть использовано понятие частичного отказа. Частичный отказ в системах электроснабжения проявляется в виде недоотпуска электроэнергии потребителям. К частичным отказам, приводящим к изменению режимов работы ЭУ и переходу системы из одного состояния в другое, можно отнести сбой послеаварийной автоматики, неправильную настройку регулирующих и компенсирующих устройств и т.д. Следует отметить, что не только полные отказы, но и частичные, вызывающие понижение уровня функционирования системы (Ч-Э-С), например, отказ коммутационных аппаратов при локализации инициирующего события, могут вызвать каскадное развитие аварии и привести к массовому нарушению электроснабжения потребителей.

Отметим, что все отказы, возникающие в электроустановках, могут рассматриваться как случайные события. Тогда вероятность безотказной работы $P(t)$, т.е. вероятность того, что время от включения до первого отказа будет больше некоторой заданной величины t , равна $P(t)=P(\varepsilon > t)$. Средняя длительность безотказной работы ЭУ:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t)dt, \quad (29)$$

может рассматриваться как числовая характеристика её надёжности.

Выбор математической модели отказов опирается на существующее в настоящее время представление, согласно которому для большинства электротехнических изделий (кабели, электродвигатели и т.д.) характерно в процессе эксплуатации наличие трёх периодов:

1) приработка, в течение которого опасность отказа монотонно уменьшается,

2) нормальный рабочий режим, когда опасность отказов остаётся практически постоянной,

3) старение (износ), когда опасность отказов начинает монотонно возрастать до наступления критического состояния, т.е. возникновения аварии. Причём, такому процессу ухудшения надёжности подвержены изоляционные, токоведущие и конструкционные части электроустановки.

Постоянной опасности отказов соответствует экспоненциальное распределение времени безотказной работы, для которого

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \lambda > 0, t > 0, \quad (30)$$

Параметр этого распределения λ , который называется интенсивностью отказов, является величиной, обратной средней длительности T_{cp} , безотказной работы:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}, \quad (31)$$

Для описания отказов, обусловленных износом, используется нормальное распределение, логарифмически нормальное, распределение Вейбула, являющиеся двухпараметрическими (зависящими от средней долговечности и стандартного отклонения).

Безопасность. Рассмотрим подход к оценке техногенной опасности ЭУ, в основу которой положим концепцию полного отказа. Суть этой концепции состоит в том, что отказ электроустановки или системы электроснабжения интерпретируется как причина техногенных угроз, приводящих либо к электропоражению, либо к возникновению пожара.

В свете постановки общей задачи повышения эффективности функционирования системы (Ч-Э-С) понятия «надёжность» и

«безопасность» являются взаимосвязанными, ибо высокая надёжность электроустановок производственного объекта определяет и высокий уровень безопасного его обслуживания. Однако следует различать, что надёжность, например, СЭС, предполагает только гарантию возможности выполнения свойственных ей функций (обеспечение передачи электроэнергии), тогда как безопасность связана с вероятностью нанесения вреда (ущерба) здоровью человека, сельскохозяйственным животным и среде обитания.

В настоящее время физические процессы, характеризующие степень опасности электроустановок до 1000 В, остаются недостаточно изученными и практически непрогнозируемыми. Причиной тому является отсутствие современных методов неразрушающего контроля и средств интроскопии, невозможность формализации человеческого фактора. Сюда следует отнести также проблематичность постановки натуральных экспериментов и использование методов физического моделирования. Ввиду недостатка информации для строгого применения вероятностных моделей и снятия неопределённости перспективным подходом является метод оценки техногенных рисков на основе теории нечётких множеств.

Эргономичность - в общем случае характеризует взаимодействие человека с объектом труда (электроустановкой, системой электроснабжения) как на стадии проектирования, так и при эксплуатации производственного объекта. Целью повышения эргономических показателей человеко-машинной системы является создание таких условий, которые бы обеспечивали наибольшую производительность труда при минимизации негативного влияния человеческого фактора.

Экономичность. Создание комплексной системы обеспечения безопасности электроустановок, (включая электрическую, пожарную и экологическую), как известно, требует значительных материальных и финансовых ресурсов. Одной из основных причин ухудшение техногенной обстановки в стране, как уже отмечалось, является критическая изношенность основных производственных фондов, повлёкшая за собой массовые случаи аварий и электротравматизма на объектах коммунальной энергетики и АПК. В настоящее время Россия и многие развитые страны, понимая неразрешимость проблемы адекватного финансового обеспечения, перешли от принципа

абсолютной безопасности к стратегии повышения такого её уровня, который только возможен с учётом сложившегося социально-экономического положения страны (принцип приемлемого риска). Таким образом, прослеживается взаимная связь между уровнем техногенной безопасности ЭУ и совокупностью экономических факторов, влияющих прямо или косвенно на безопасность не только персонала, но и в целом населения России, обеспечивая сохранность жизни и здоровья граждан. Следовательно, достаточно полное описание техногенной безопасности человеко-машинной системы (Ч-Э-С) может быть представлено четырьмя основными показателями (рисунок 20), каждый из которых отражает одну значимую характеристику (свойство) рассматриваемого объекта. Например, показатели А, Б, В и Г, их вариации численных значений могут в процессе эксплуатации оценивать возможность отказа и развития аварии, устойчивость к воздействию внешних неблагоприятных факторов, тяжесть последствий (в том числе, экономические риски) и затраты на создание системы обеспечения безопасности электроустановок объекта.

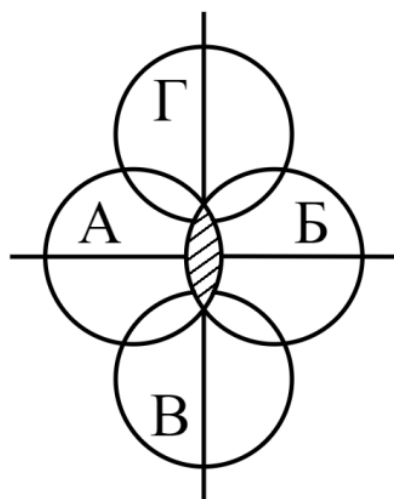


Рисунок 20 – Составные компоненты анализа надежности (А), безопасности (Б), В (эргономичности), Г (экономичности)

На различных этапах жизненного цикла структура системы (Ч-Э-С) может существенно меняться. При проектировании обычно рассматриваются несколько вариантов структуры, в основу которых закладываются наиболее лучшие показатели А, Б, В и Г. Для эффективного анализа этих показателей необходима разработка методов и программных средств моделирования и оптимизации,

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

включая выбор соответствующих критериев. Перечисленные показатели будем относить к общесистемным, характеризующим структурные и функциональные свойства модели (Ч-Э-С).

Качество функционирования и алгоритм, обеспечивающий получение результатов, можно оценивать такими частными показателями как результативность и ресурсоемкость. Первый - обуславливается полученным целевым эффектом, т. е. целью функционирования системы (Ч-Э-С). Второй - характеризуется ресурсами всех видов (материальными, информационными и т.д.).

Представленная на рисунке 19 иерархическая структура человеко-машинной системы (Ч-Э-С) отражает три уровня и включает соответствующие компоненты и элементы, полученные путём декомпозиции рассматриваемой системы. Её составные части отражают отдельные признаки реального объекта и поэтому имеют свои цели, функции и ограничения. Вместе с тем, принадлежность «комплектующих» к целостному образованию даёт основания рассматривать их показатели эффективности, обладающие единичными системными свойствами, включающими:

1) Ясность физического смысла, которая диктуется стремлением измерять показатели с помощью количественных мер, доступных для восприятия. В противном случае вводятся субъективные оценки, лишённые физического смысла. Требование ясности физического понимания ограничивает возможность агрегирования частных показателей в один обобщённый.

2) Полноту показателей эффективности, которая должна отражать желательные (целевые) и нежелательные (побочные) последствия функционирования системы. В качестве примера можно привести отказ в системе электроснабжения, который несёт не только отрицательные последствия, но и положительные (прерывается причинно-следственная цепь происшествий). Полнота, в частности, проявляется в монотонном характере функции полезности, построенной для соответствующего показателя.

3) Возможность измерения показателей с помощью натурального или модельного эксперимента. При этом выбор способа измерения определяется полнотой исходной информации:

- в условиях определённости показатели эффективности являются детерминированными;

- в условиях неполноты информации - показатели представляются дискретными случайными величинами с известными законами распределения;

- в условиях неопределённости (отсутствие или неточность информации) показатели описываются интервальной неопределённостью с неизвестными законами распределения.

10. Анализ методов представления времени в задачах моделирования и оценки техногенных рисков

Основные сведения о темпоральной логике. Хорошо известно, что классическая логика уже достаточно долго и очень широко используется в различных областях науки, техники и технологий, но ее ограниченность в применении на данный момент очевидна. Классическая логика базируется на самой простой модели истинности, она не может выразить степень уверенности или неуверенности в истинности того или иного высказывания. Формулы этой логики принимают только значения «да» или «нет», но не определяют интервал возможных значений рассматриваемого высказывания. Формулы классической логики истинны или ложны независимо от времени и распространяются только на статический мир, где временные связи никак не учитываются. Вследствие этого, аппарат данной логики оказался практически не применим во многих областях знаний.

Большую часть утверждений, нуждающихся в логической формализации с учетом времени, составляют свойства технических систем, поведение которых может динамически изменяться. Например, утверждение: «Отправленный запрос обязательно в будущем будет обработан» не может быть адекватно логически формализовано в простой логике.

Довольно долго многие ученые в области математической логики пытались найти выход из сложившейся ситуации, и он был найден американским математиком Артуром Прайором, предложивший расширить стандартную классическую логику специальными категориями - модальностями, которые ставятся перед высказыванием и каким-либо образом характеризуют его. Им были определены модальности, которые характеризуют истинность того или иного

высказывания в зависимости от интервала времени, в котором оно выполняется. Логика, расширенная таким типом модальности, называется временной, или темпоральной.

Основной идеей темпоральной логики является то, что появляется возможность фиксировать только относительный порядок событий - настоящее, будущее и прошедшее время, при этом совсем неважно, при каких определенных значениях времени наступали те или иные события, важно только показать порядок следования событий, отношения между моментами времени, в которых эти события были истинными. Также с помощью аппарата темпоральной логики можно указать временные причинно-следственные связи между различными факторами, влияющими на ту или иную ситуацию.

Учет причинно-следственных связей в контексте времени делает темпоральную логику удобным инструментом для управления различными технологическими процессами, а также поиска ошибок в функционировании технических систем в таких сферах производства как:

- управление транспортом, в том числе ракетных комплексов;
- медицинская техника и системы;
- электронный бизнес;
- средства связи.

Пренебрежение поиском ошибок в управляющих каким-либо процессом программах может привести к огромному ущербу при выходе из строя дорогостоящего оборудования, а также вреду здоровью и даже гибели людей. Ярким примером такого пренебрежения могут послужить следующие ситуации, приведшие к очень негативным последствиям. Крушение первого ракета-носителя класса Ariane - 5 04.06.1996 г. из-за ошибки в управляющей программе привело к ущербу на общую сумму более 1 млрд, долларов США. Из-за подобной ошибки в программном обеспечении при эксплуатации медицинского ускорителя Therac - 25 (1985-87 г.г.) во время противораковой лучевой терапии в результате передозировки радиацией погибло 6 человек. Такого ущерба и жертв можно было бы избежать, если бы для проверки программ управления процессами использовался аппарат темпоральной логики. В будущем данный тип логики лег в основу большинства алгоритмов по верификации (проверке на структурные ошибки) управляющих программ.

В общем виде темпоральная логика включает в себя стандартные высказывания, выраженные с помощью классической логики темпоральных операторов, которые указывают на временные причинно-следственные связи между процессами (всегда (иногда) в прошлом (будущем)), а так же логические операции такие как: логическое отрицание «НЕ - \neg », конъюнкция «И - \wedge », дизъюнкция «ИЛИ - \vee », импликация « \Rightarrow » и эквивалентность « \Leftrightarrow », которые каким-либо образом характеризуют темпоральные высказывания.

Существует большое количество видов темпоральных логик, основными в использовании из которых являются: первопорядковые, модальные и интервальные логики.

В первопорядковой темпоральной логике время выступает в качестве аргумента в предикатах. Эти логики основаны на тех же законах, что и классическая логика высказываний, что обуславливает простоту их применения. Однако они совсем не обеспечивают возможности удобной формализации сложных высказываний.

В модальных темпоральных логиках к классическим логическим связкам добавляются модальные темпоральные операторы. Например, модальные операторы логики Прайора Until (до тех пор, пока), Release, Next (в следующий момент времени), Future (когда-нибудь в будущем), Globally (всегда в будущем), All и Exists выражают высказывания, истинные для определенных моментов времени, либо - с помощью производных операторов - для совокупности моментов времени в прошлом или будущем. Среди модальных логик особо можно выделить пропозициональную темпоральную логику (PTL - Propositional Temporal logic). PTL является модальной темпоральной логикой, построенной на основе классической логики в сочетании с темпоральными операторами дискретного линейного времени. Расширением логики PTL является пропозициональная темпоральная логика ветвящегося времени (BPTL - Branching Time Propositional Temporal logic). В линейной дискретной PTL в качестве модели времени применяется упорядоченная последовательность натуральных чисел, при этом каждое состояние имеет только одно последствие. В ветвящейся логике BPTL каждое состояние может иметь более одного последствия и является множеством возможных путей из данного состояния (как следствие, возможно несколько различных «будущих»). Модель времени в логике BPTL - это

бесконечное дерево, каждая вершина которого имеет конечное, ненулевое число последствий. Допускается существование лишь одного прошлого, но при этом будущее может быть открытым.

Кроме того, существуют события, которые происходят на конечных временных интервалах, поэтому временные логики, которые состоят лишь из одного высказывания (точечные логики) не позволяют выражать их разнообразные типы. Современные представления о времени позволяют применять сразу несколько отношений порядка, не только «раньше», «позже», но и «строго раньше», «примыкает», «пересекается», «включает в себя» и т.д. Они используются в интервальной временной логике и обеспечивают возможность квантификации и подстановки высказываний в качестве аргументов временных предикатов. В интервальной темпоральной логике Дж. Аллена применяются базисные временные предикаты, использование которых позволяет выражать высказывания в пределах языка логики первого порядка.

В дальнейшем будет показано, что для оценки рисков опасности электроустановок достаточно удачно будет подходить аппарат пропозициональной темпоральной логики прошлого РТЛ в сочетании с интервальной логикой Дж. Аллена. Именно поэтому данные виды логики будут рассмотрены более подробно.

*Формализация простых темпоральных высказываний.
Пропозициональная временная логика РТЛ.*

Для того чтобы учесть временной фактор при формализации простых высказываний очень удобно использовать аппарат темпоральной пропозициональной логики РТЛ.

Логика РТЛ является более простой в реализации, нежели другие виды темпоральных логик. РТЛ, как уже говорилось, является модальной темпоральной логикой, которая построена на основе классической логики в сочетании с модальными темпоральными операторами дискретного линейного времени.

Синтаксис РТЛ может задаваться следующим образом. Языком РТЛ является конечное множество простейших атомарных утверждений, которые можно обозначить, например p, q, r, s, \dots

При этом формулы строятся на основе следующих символов:

- множество пропозициональных символов языка L_p ;
- классические логические связки: $\neg, \wedge, \vee, \Rightarrow, \Leftrightarrow$;

- темпоральные операторы будущего времени: унарные - O, \diamond, \square ;
бинарные - U, W ;

- темпоральные операторы прошлого времени: унарные - $\otimes, \bullet, \blacklozenge, \blacksquare$; бинарные - J, Z .

Для унарных операторов также возможно определение истинности высказываний на некотором интервале времени, который может нами непосредственно задаваться.

Множеством правильно построенных формул (ППФ) PTL являются:

- все пропозициональные символы языка L_P есть ППФ;
- если A и B - ППФ, то ППФ также будут и следующие выражения: $A, A \wedge B, A \vee B, A \Rightarrow B, A \Leftrightarrow B; OA, \diamond A, \square A, AUB, AWB; \bullet A, \otimes A, \blacklozenge A, \blacksquare A, AJB, AZB$.

При этом можно определить смысл модальных темпоральных операторов. Унарных: O - следующий (next), \bullet - прошлый (last), \otimes - прошлый (last), \square - всегда в будущем (always in the future), \blacksquare - всегда в прошлом (always in the past), \diamond - иногда в будущем (sometime in the future), \blacklozenge - иногда в прошлом (sometime in the past); бинарных: U - до тех пор, пока (until), W - пока не (unless), J - с тех пор, как (since), Z - с тех пор, как (zince).

Для унарных операторов также возможно определение истинности простых высказываний на некотором интервале времени, который может непосредственно задаваться. Например, для некоторого интервала времени от k до n эти операторы запишутся следующим образом: « $\blacklozenge_{n,k}$ - иногда в прошлом на интервале», « $\blacksquare_{n,k}$ - всегда в прошлом на интервале» и аналогично для других унарных операторов.

Для задания семантики PTL используется семантика возможных миров Крипке. Отсюда вытекает понятие о пропозициональной темпоральной логике ветвящегося времени BPTL, которая была разработана в 1998 г. и являющаяся расширением пропозициональной темпоральной логики PTL.

Достаточно часто приходится сталкиваться с такими ситуациями, когда принятие того или иного решения может осуществляться по нескольким путям (т. е. имеется некая альтернатива при принятии решения), но при этом реализуется только одна из конкретных ситуаций.

В графическом виде такие процессы могут изображаться как на рисунке 21 и называются они структурой Крипке. На данном рисунке под пунктом *а* изображена модель системы переходов с конечным числом состояний, а под пунктом *б* дерево всех возможных состояний, представляющее собой развертку системы, изображенной на рисунке 21 а.

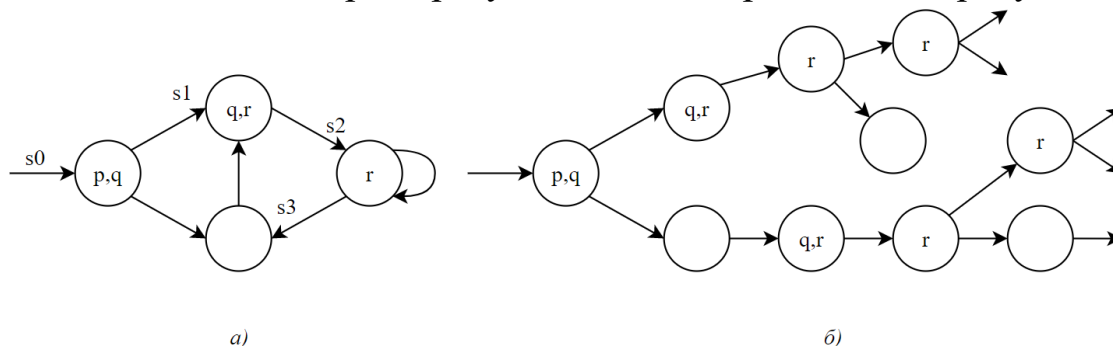


Рисунок 21 - Графическое представление структуры Крипке:
а) - замкнутая структура; *б)* - развернутое дерево состояний

Таким образом, бесконечную последовательность миров можно легко представить в виде последовательности, имеющей конечное состояние системы. Структура Крипке имеет конечное множество состояний и переходов между ними, при этом каждое из состояний отмечено множеством истинных в этом состоянии атомарных утверждений. Под атомарным утверждением (предикатом) здесь понимается утверждение, которое имеет ложное или истинное значение, от значения и структуры которого мы абстрагируемся, т. е. важным является только истинность и ложность этих высказываний, а не то, как они построены и каким образом определяется их истинность. При этом формально структуры Крипке выглядит следующим образом:

$$M = (S, S_0, R, AP, L_p), \quad (32)$$

где S - конечное непустое множество состояний;

$S_0 \subseteq S$ - непустое множество начальных состояний;

$R \subseteq S \times S$ - тотальное отношений на S , т. е. множество переходов, которые удовлетворяют требованию $(\forall s \in S)(\exists s' \in S)(s, s') \in R$ (из каждого состояния существует переход);

AP - конечное множество атомарных утверждений;

L_p - функция пометок (каждому состоянию отображение L сопоставляет множество истинных в нем атомарных предикатов).

Тогда для последовательности состояний системы, представленной на рисунке 21, структура Крипке аналитически будет иметь вид:

$$S = (s_0, s_1, s_2, s_3), S_0 = s_0, AP = (p, q), L(s_1) = (q, r), L(s_2) = (r), L(s_3) = () .$$

Траекторией структуры Крипке состояний $s_0, s_3, s_1, s_2, s_2, s_3$ является следующая цепочка: $(p, q) () (q, r) (r) (r) \dots$

Таким образом, каждое состояние структуры Крипке отмечено определенным множеством атомарных предикатов, истинных в данном состоянии. Структурой Крипке можно считать расширение конечного автомата, в котором отсутствуют пометки перехода, так как целью данной структуры является задание конечным образом бесконечной последовательности состояний при произвольных значениях входа. В структуре Крипке не рассматривается причина перехода - определенные события, существенные в модели конечного автомата. Главным же достоинством этой достаточно простой модели является возможность конечным образом задавать поведение дискретных систем: бесконечное число бесконечных состояний и создаваемых ими траекторий.

Следует уточнить, что семантика РТЛ в виде структуры Крипке может задаваться как для линейной пропозициональной логики, так и для ветвящейся логики ВРТЛ. Отличие будет состоять лишь в том, что в линейной темпоральной логике РТЛ моделью времени является упорядоченная последовательность натуральных чисел. Следовательно, каждое состояние имеет одного преемника. В ветвящейся же логике ВРТЛ для каждого состояния совсем не обязательно наличие единственного преемника и может быть множество возможных путей (последовательностей состояний) из любого данного состояния и, следовательно, возможно несколько различных «будущих».

Заключение

В последние годы в обществе наметились положительные тенденции в понимании важности проблемы техногенной безопасности электроустановок и систем электроснабжения. Эта проблема включает совокупность многоцелевых задач обеспечения безопасности (электрической, пожарной и биоэлектромагнитной - экологической), комфортности среды обитания человека и сельскохозяйственных животных, а также надежного функционирования информационного и технологического электрооборудования.

Распределительные электрические сети 0,4 кВ являются наиболее распространенными, на их долю приходится более 80% общей протяженности воздушных линий. Для этих сетей характерны старение основных фондов, выработка срока службы остаточного ресурса. Существующая система электроснабжения потребителей в настоящее время не удовлетворяет условиям электромагнитной совместимости, как следствие этого – ухудшение показателей качества электроэнергии, увеличение электрических потерь. Что касается биологического влияния электрических и магнитных полей линии электропередач и различных источников электромагнитных излучений на организм человека и сельскохозяйственных животных, то, несмотря на достаточно большой объем проведенных исследований, полученные результаты в ряде случаев противоречивы, неясны и трудно поддаются интерпретации. В этом случае затрудняется задача по выбору адекватных электрозащитных мероприятий. Важным, на наш взгляд, является использование многокритериальных моделей, при этом оценка эффективности систем техногенной безопасности может быть проведена путем анализа совокупности технических, экономических и экологических показателей.

Для поддержания высокой эффективности функционирования электроустановок требуется мониторинг и диагностика технического состояния, анализ опасностей и рисков, связанных с эксплуатацией систем электроснабжения. Это требует, в свою очередь, поиска новых нетривиальных подходов, направленных на выработку оптимальных решений в области управления рисками в человеко-машинных системах.

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никольский, О.К. Контроль и предотвращение пожаров от токов утечки в электроустановках производственного объекта / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № 5(53). – DOI 10.51419/202125538.
2. Никольский, О.К. Сценарная модель оценки и прогнозирования рисков опасности электроустановок на основе анализа человекомашиной системы / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № S5-1. – DOI 10.51419/20212S1103.
3. Шлионская, Ю.Д. Имитационная модель функционирования человеко-машинной системы и показатели её эффективности / (Ю.Д. Шлионская, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № S5-1. – DOI 10.51419/20212S1106.
4. Никольский, О.К. Концепция и основы гибридного метода прогнозирования опасности электроустановок / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Е.А. Басуматорова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2023. – № 3(101). – С. 207-212
5. Никольский, О.К. Принципы диагностирования и ситуационного управления антропогенной безопасностью электроустановок АПК / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Е.А. Басуматорова // Вестник Башкирского ГАУ. – 2023.
6. Никольский, О.К. Модель принятия решений на основе идентификации опасных ситуаций в электроустановках / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский // АгроЭкоИнфо. – 2023. – № 2(56). – DOI 10.51419/202132212.
7. Фараносов, В.В. Многокритериальное управление антропогенными рисками опасности электроустановок / В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, О.К. Никольский // АгроЭкоИнфо. – 2023. – № 2(56). – DOI 10.51419/202132213.
8. Никольский, О.К. Диагностирование модели антропогенных рисков электроустановок на основе статистического прогнозирования. Сообщение I / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский // АгроЭкоИнфо. – 2023. – № 3(57). – DOI 10.51419/202133329.

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

9. Никольский, О.К. Принципы построения системы поддержки принятия решений при управлении рисками электроустановок / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Е.С. Истомина // АгроЭкоИнфо. – 2023. – № 2(56). – DOI 10.51419/202132235.

10. Никольский, О.К. Модель многокритериальной оценки и управления антропогенными рисками опасности электроустановок в человеко-машинной системе / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Е.А. Басуматорова // Известия Воронежского ГАУ. – 2023.

11. Басуматорова, Е.А. Концепция проектирования системы принятия решений для оценки антропогенного риска опасности сельскохозяйственных установок / Д.О. Суринский, О.К. Никольский, В.В. Фараносов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – №4. – С. 116-119.

12. Никольский, О.К. Концептуальные основы имитационного моделирования антропогенных процессов при эксплуатации электроустановок / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Н.И. Смолин // АгроЭкоИнфо. – 2023. – № 3(57). – DOI 10.51419/202133310.

13. Никольский, О.К. Математические модели многокритериальной оптимизации рисков электроустановок / О.К. Никольский, Т.М. Халина, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский / Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо». – 2023.

14. Никольский, О.К. Метод оценки и прогнозирования остаточного ресурса электроустановок в человеко-машинных системах / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Н.И. Смолин // Электронно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо». – 2023.

15. Никольский, О.К. Диагностирование модели антропогенных рисков электроустановок на основе статистического прогнозирования / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Н.И. Смолин // Известия Оренбургского ГАУ. – 2023.

16. Никольский, О.К. Концепция приемлемого риска в области техногенной безопасности / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Н.И. Смолин // Известия Оренбургского ГАУ, – 2023.

17. Никольский, О.К. Диагностирование модели антропогенных рисков электроустановок на основе статистического

прогнозирования / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский // Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо». – 2023.

18. Никольский, О.К. Модели комплексной оценки антропогенной безопасности труда в человекомашинных системах / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский // Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо». – 2023.

19. Никольский, О.К. Основы стратегии повышения антропогенной безопасности и оптимизации рисков электроустановок в сельском хозяйстве / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский // Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо». – 2023.

20. Никольский, О.К. Антропогенные риски электроустановок с учетом концепции стоимости человеческой жизни / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, К.И. Филимонов // Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо». – 2023.

21. Никольский, О.К. Имитационное моделирование и методы определения уровня пожарной безопасности электроустановок на объектах АПК / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Е.В. Усков // Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо». – 2024.

22. Никольский, О.К. Метод оптимизации антропогенных рисков опасности электроустановок / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Е.В. Усков // Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо». – 2024.

23. Никольский, О.К. Методы анализа безопасности электроустановок в человекомашинных системах / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Е.В. Усков // Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо». – 2024.

24. Никольский, О.К. Многокритериальная оценка антропогенного риска опасности электроустановок на основе имитационного моделирования / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Е.В. Усков. // АгроЭкоИнфо. – 2024. – № 1 (61).

25. Фараносов, В. В. Концепция многокритериальной оптимизации безопасности электроустановок в человеко-машинных системах / О.К. Никольский, Л.В. Куликова, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Е.А. Басуматорова // Известия Оренбургского ГАУ. – 2024.

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

26. Никольский, О.К. К вопросу оценки рисков опасности человекомашинных систем / О.К. Никольский, Т.М. Халина, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, Е.А. Басуматорова // Известия Оренбургского ГАУ. – 2024.

27. Еремина, Т.В. Подход к оценке антропогенной надежности и безопасности электроустановок в условиях неопределенности на предприятиях агропромышленного комплекса / Т.В.Ерёмина, И.А. Галегузова, О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Ю.Д. Шлионская // Вестник ВСГУТУ. – 2023. – № 4 (91). – С. 41-48.

28. Никольский, О.К. Разработка экспертной системы диагностирования опасности электроустановок производственного объекта агропромышленного комплекса / О.К. Никольский, В.В. Фараносов, Ю.Д. Шлионская, Т.В. Ерёмина, М.Б. Балданов // Вестник ВСГУТУ. – 2023. – № 4 (91). – С. 49-55.

29. Никольский, О.К. Многокритериальная оценка антропогенного риска опасности электроустановок на основе имитационного моделирования / О.К. Никольский, Л.В. Куликова, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 1 (363). – С. 158-164.

30. Куликова, Л.В. Диагностирование и управление антропогенными рисками опасности электроустановок на объектах АПК / Л.В. Куликова, О.К. Никольский, Т.М. Халина, В.В. Фараносов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 1 (363). – С. 165-172.

31. Никольский, О.К. Вероятностная модель системы антропогенной электробезопасности / О.К. Никольский, Л.В. Куликова, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – № 6 (236). – С. 61-67.

32. Фараносов, В.В. Программа мониторинга и передачи данных о состоянии кабельной линии / В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, И.А. Щинников, Е.А. Басуматорова // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024619146, 19.04.2024. Заявка от 01.02.2024.

33. Фараносов, В.В. Система локального контроля электроустановки «СЛКЭ» / В.В. Фараносов, О.К. Никольский, Л.В. Куликова, Д.О. Суринский // Патент на полезную модель. Заявка № 2024110773 от 18.04.2024 г.

МОНОГРАФИЯ

**Никольский О. К., Суринский Д. О., Куликова Л. В.,
Фараносов В. В., Шлионская Ю. Д.**

34. Никольский, О.К. Экспертная система диагностирования и оптимизации антропогенных рисков электроустановок в человеко-машинных системах: монография / О.К. Никольский, Л.В. Куликова, Д.О. Суринский, В.В. Фараносов, Ю.Д. Шлионская. Тюмень; Изд-во Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2024, - 60 с.

35. Никольский, О.К. Функционирование системы техногенной безопасности электроустановок: монография / О.К. Никольский, Т.М. Халина, Ю.Д. Шлионская. Изд. 1-е, стер. — Republic of Moldova: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2021. — 359 с. ISBN 978-620-4-20742-1

36. Никольский, О.К. Основы проектирования, монтажа и эксплуатации электроустановок 0,4–10 кВ / О.К. Никольский, В.И. Мозоль, Л.В. Куликова; под общ. ред. заслуженного деятеля науки и техники РФ, проф. О.К. Никольского. — Москва : Директ-Медиа, 2023. — 412 с. ISBN 978-5-4499-3690-5. DOI 10.23681/701128. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54666340>

37. Никольский, О.К. Управление и оптимизация рисков опасности электроустановок в человеко-машинных системах: монография / О.К. Никольский, Т.М. Халина, Л.В. Куликова. - Барнаул, 2024, 155 с.

Размещается в сети Internet на сайте ГАУ Северного Зауралья
<https://www.gausz.ru/nauka/setevye-izdaniya/2025/surinskiy.pdf>,
в научной электронной библиотеке eLIBRARY, РГБ, доступ свободный

Издательство электронного ресурса
Редакционно-издательский отдел ФГБОУ ВО «ГАУ Северного Зауралья».
Заказ № 1261 от 24.01.2025; авторская редакция
Почтовый адрес: 625003, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Республики, 7.
Тел.: 8 (3452) 290-111, e-mail: rio2121@bk.ru

ISBN 978-5-98346-195-6



9 785983 461956 >