

На правах рукописи



Гончаренко Георгий Александрович

**МЕТОД ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ЭЛЕКТРОПРОВОДКИ НА ОБЪЕКТАХ АПК В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Специальность 05. 20. 02 – Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Воробьев Николай Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Багаев Андрей Алексеевич,
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет», кафедра «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», заведующий кафедрой;

кандидат технических наук, доцент
Шахматов Сергей Николаевич,
ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет», институт энергетики и управления энергетическими ресурсами АПК, директор;

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Тюменская государственная сельскохозяйственная академия»

Защита диссертации состоится «10» декабря 2013 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, факс (8–3852) 36–71–29. <http://www.altstu.ru>, e-mail: elnis@inbox.ru

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

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

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



Куликова Лидия Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Бесперебойное электроснабжение сельских электропотребителей невозможно без надежной работы внутренних электрических сетей 0,4 кВ (электропроводки), проложенных в производственных зданиях и на объектах инфраструктуры сельских населенных пунктов. Электропроводка, являясь для каждого сельскохозяйственного объекта индивидуальной, представляет сложную систему, объединенную функциональными, структурными и информационными связями. Сбои в работе такой системы могут приводить к прекращению электроснабжения, простоям технологического оборудования, потере продукции и серьезным авариям. В процессе эксплуатации электропроводка (ЭП) подвергается тепловым, электрическим и механическим перегрузкам, негативным влиянием факторов внешней среды, что приводит к ускоренному старению, деградации и ее отказам (пробой изоляции, повреждение токоведущих элементов и др.). Кроме того, в зданиях и жилых домах, построенных более 50 лет назад, электропроводка выработала свой ресурс, что обусловило выход ее из строя, создание опасности электропоражений людей и сельскохозяйственных животных, возникновение пожаров.

Значительная часть отказов электропроводки связана с локальным старением изоляции, снижением электрической прочности, вызванной абсорбцией и поляризацией, повреждением проводников, заводскими дефектами изделия, монтажом, неудовлетворительной эксплуатацией и т.д. Действующая нормативная база предусматривает периодическое измерение сопротивления изоляции электропроводки (1 раз в 2 года) и визуальный осмотр, что является явно недостаточным. Сама система эксплуатации сельскохозяйственных электроустановок ограничивается лишь фактом обнаружения отказа или аварии, а не направлена на их предупреждение. Специалистам АПК приходится принимать интуитивные решения по предотвращению аварийных режимов в условиях недостаточности исходных данных, обусловленных наличием факторов, не поддающихся прогнозу.

Отсутствуют методики количественной оценки параметров надежности электропроводки в зависимости от совокупности разнородных факторов, определяющих техническое состояние (ТС) электроустановки или остаточный ресурс. Для оценки и прогнозирования остаточного ресурса электропроводки в условиях неопределенности исходной информации представляется перспективным использование нового подхода, в основе которого лежит математическая теория нечетких множеств.

Работа выполнена в соответствии с Концепцией развития аграрной науки и научного обеспечения АПК России до 2025 года (МСХ РФ, приказ от 25 июня 2007 г. № 342) и аналитической ведомственной программой «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009-2011 гг.).

Целью работы является повышение надежности, безопасной и экономической эксплуатации электропроводки на объектах АПК путем обоснования мето-

да, позволяющего проводить оценку и прогнозирование остаточного ресурса ЭП.

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

1. Анализ отказов электропроводки зданий и сооружений, существующих методов контроля ТС электроустановок 0,4 кВ.
2. Обоснование диагностических параметров и разработка метода оценки технического состояния, позволяющего определить остаточный ресурс электропроводки.
3. Разработка метода прогнозирования остаточного ресурса на основе нечеткой логики.
4. Проведение экспериментальных исследований ТС электропроводки производственных объектов, общественных зданий и жилых домов.
5. Разработка метода оптимизации интегрированного риска опасности ЭП.

Идея работы заключается в разработке нечеткого алгоритма оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса ЭП, с помощью которого представляется возможным преодолеть существующую неопределенность и неоднозначность информации об объекте контроля и обоснованно принимать решения по увеличению срока службы ЭП за пределами нормативного значения, либо вывода ее в ремонт или замены при возникновении риска опасности дальнейшей эксплуатации.

Объект исследования. Электропроводки производственных помещений, объектов инфраструктуры села и жилых домов.

Предмет исследования. Контроль ТС электропроводки с целью увеличения ее остаточного ресурса.

Методология и методы исследования. Теория электрических цепей, имитационное моделирование, методы математической статистики, элементы теории нечетких множеств.

Научную новизну представляют:

1. Концепция остаточного ресурса электропроводки зданий, в основе которой лежит выбор диагностических параметров, определяющих техническое состояние электроустановки при эксплуатации.
2. Метод оценки остаточного ресурса электропроводки по результатам диагностики ее технического состояния.
3. Метод прогнозирования остаточного ресурса электропроводки в условиях неопределенности путем применения нечетких логических вычислений.
4. Математические модели, устанавливающие закономерности изменения диагностических параметров электропроводки от факторов внешней среды.
5. Метод оптимизации интегрированного риска опасности ЭП.

Практическая ценность состоит в разработке методики и алгоритма расчета остаточного ресурса электропроводки, направленных на снижение отказов и аварийности электроустановок, повышение уровня электропожаробезопасно-

сти до нормативных значений, снижение эксплуатационных затрат и технологического ущерба от простоев производственных процессов.

Реализация результатов работы. Научные положения и выводы использованы при разработке «Методических рекомендаций по оценке остаточного ресурса электропроводки объектов АПК», принятых Главным управлением сельского хозяйства Алтайского края для практического использования.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре электрификации производства и быта АлтГТУ и Рубцовском индустриальном институте при изучении дисциплин «Основы электромагнитной совместимости» и «Техническая диагностика».

Апробация работы. Основные материалы и научные результаты работы докладывались и обсуждались на 10-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь - 2013" (НиМ - 2013) (Барнаул, 2013 г.); XI Международной научно-практической интернет-конференции " Энерго- и ресурсосбережение - XXI век", (г. Орел, 2013 г.); Всероссийской молодежной конференции «Современные аспекты энергоэффективности и энергосбережения» (г. Казань, 2013 г.); 61-й Международной молодежной научно-технической конференции "Молодежь. Наука. Инновации" (г. Владивосток, 2013 г.).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Критерии диагностики технического состояния ЭП с учетом факторов старения и отказов.
2. Метод количественной оценки диагностических параметров, позволяющих определить остаточный ресурс ЭП.
3. Результаты экспериментальных исследований старения и повреждения ЭП.
4. Метод прогнозирования остаточного ресурса ЭП на основе нечеткой логики, позволяющий в условиях неопределенности обоснованно принимать управленческие решения.
5. Метод оптимизации интегрированного риска опасности ЭП.

Публикации. По материалам диссертационных исследований опубликовано 13 печатных работ, в том числе 7 - в изданиях по перечню ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 214 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков, 46 таблиц, 9 приложений. Список литературы включает 127 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, ее научная новизна и практическая ценность, изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ технического состояния электропроводки, эксплуатирующейся в условиях сельскохозяйственного производства и быта населения. Рассмотрен механизм старения и деградации изоляционной и токо-

проводящей частей электропроводки. Приведены статистические данные по электротравматизму и пожарам, произошедших в электропроводках, проанализированы основные причины отказов. Рассмотрены используемые методы и средства контроля и диагностики технического состояния электропроводки зданий.

Развитие электровооруженности села, специфические условия эксплуатации и обслуживания электропотребителей выдвигают серьезную проблему обеспечения надежности и техногенной безопасности электроустановок напряжением 380/ 220 В. Ухудшение надежности функционирования электрохозяйства аграрного сектора приводит к невосполнимым потерям людских и материальных ресурсов, ухудшению экологической обстановки.

В настоящее время состояние электро-пожаробезопасности окружающей среды является неудовлетворительным. Ежегодно только в электроустановках зданий гибнет более 4500 человек, около 30 тысяч – получают увечья и инвалидность, при этом на долю сельской местности приходится порядка 70% от общего числа электротравм. Наибольший электротравматизм имеет место в сельском хозяйстве, в сфере производства и быта населения. Особую опасность представляют внутренние электропроводки, распределительные щитки, передвижные электроустановки и ручной электроинструмент. Более 40% травм происходят вследствие попадания человека под напряжение в результате повреждения изоляции электроустановок. Неблагоприятной также является пожарная обстановка: значительную часть (до 25%) составляют пожары, вызванные действием электрического тока. До 70% пожаров происходит из-за коротких замыканий электропроводки. Для России характерен самый высокий в мире уровень гибели и травмирования людей при пожарах. Этот показатель в 5 – 7 раз больше, чем в развитых странах. Так, в 2011 году было зафиксировано около 168,5 тысяч пожаров, погибло почти 14 тысяч человек, прямой материальный ущерб причинен в размере около 14 миллиардов рублей. Необходимо также иметь в виду, что эксплуатация электроустановок в сельском хозяйстве имеет ряд специфических особенностей, к числу которых относятся: наличие электрооборудования в помещениях с повышенной опасностью или особо опасных, а так же вне помещений; неудовлетворительное состояние и ведение электрохозяйства; отсутствие профилактических испытаний изоляции и технической диагностики. Однако доминирующим фактором угрозы техногенной опасности следует считать критическим износ электропроводок и коммутационного оборудования. Более половины всех зданий имеют электропроводку с выработанным нормативным сроком службы и подлежит полной её замене, что требует значительных капитальных вложений. Приведенные соображения убедительно показывают важность решения задачи оценки и обеспечения нормативного уровня техногенной безопасности электропроводки в современных условиях развития АПК. В этой связи приобретает актуальность прогнозирование остаточного ресурса электроустановок зданий, совершенствование способов контроля и диагностики технического состояния.

В диссертации рассмотрен подход, в основе которого лежит принцип «техногенной безопасности», согласно которому диагностика технического состояния ЭП может осуществляться по показателям (или параметрам), обеспечивающим его надежность и безопасность в соответствии с действующими нормативами. В этом случае остаточный ресурс или время работы до первого отказа ЭП можно рассматривать как суммарную наработку от момента контроля ТС до перехода в предельное состояние. Тогда оценивать ресурс ЭП можно некоторой совокупностью диагностических параметров и показателей. Примем, что диагностический параметр поддается количественной оценке путем его измерения, а диагностический показатель – только качественной оценке из-за невозможности его измерения.

Для оценки техногенной опасности ЭП электроустановок проведена систематизация основных дефектов и способов контроля ее технического состояния (табл. 1).

Электропроводка здания может иметь остаточный ресурс не только до истечения расчетного срока службы, но и после него. Действующие нормы и методы расчета срока службы электропроводки предусматривают обеспечение надежности и безотказности, износостойкости при наиболее неблагоприятных условиях внешней среды (повышенной влажности, колебаний температуры и др.), влияния электрического и теплового поля, механического воздействия, т.е. тех факторов, которые приводят к преждевременной деградации и выходу из строя токоведущих и изолирующих частей проводки.

Таблица 1 – Систематизация основных дефектов электропроводки и способы их контроля

Эксплуатационные дефекты		Способы контроля (измерения)	
Проводники	Изоляция	Проводники	Изоляция
-Окисление. -Усталость металла. -Коррозия металла. -Нагрев токоведущих элементов. -Нагрев контактных соединений. -Образование свищей и трещин. Частичные (микро) разрывы электрических цепей.	-Электрическое и тепловое старение диэлектрика. -Снижение объемного и поверхностного сопротивлений. -Повышение диэлектрических потерь. -Эрозионный износ. -Образование токопроводящих мостиков. -Кавитация. -Увлажнение. -Искрообразование. -Обугливание. -Пробой: электрический, тепловой.	-Измерение целостности электрических цепей. -Измерение активного сопротивления контактных соединений. -Измерение температуры контактных и переходных сопротивлений. -Измерение сопротивления цепей «фаза – фаза», «фаза-нуль» (полное, активное, реактивное). -Измерение сопротивления заземляющего устройства.	-Измерение сопротивления изоляции -Измерение тока утечки на землю (под нагрузкой). -Измерение (вычисление) коэффициента абсорбции (определение степени увлажнения изоляции). -Измерение (вычисление) коэффициента поляризации (определение степени старения изоляции).

Основными факторами, определяющими надежность ЭП, являются электрическая изоляция и состояние токоведущих ее элементов (рис. 1).

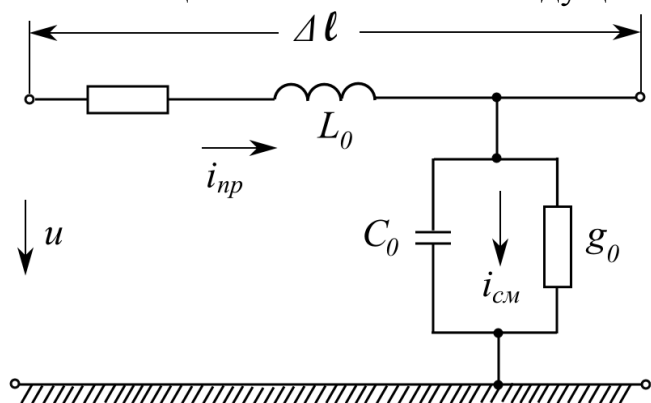


Рис. 1 – Схема замещения ЭП

Элемент Δl электропроводки может рассматриваться как однородная линия с распределенными параметрами, описываемая уравнениями в частных производных:

$$\begin{aligned} - \frac{\partial u(t, \ell)}{\partial \ell} &= r_0 i(t, \ell) + L_0 \frac{\partial i(t, \ell)}{\partial t}, \\ - \frac{\partial i(t, \ell)}{\partial \ell} &= g_0 u(t, \ell) + C_0 \frac{\partial u(t, \ell)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где r_0 и L_0 – первичные параметры токоведущей части ЭП, обусловленные током проводимости i_{np} ; g_0 и C_0 – первичные параметры изоляционной части ЭП с током смещения i_{cm} .

Рассмотрено понятие комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_k = \varepsilon' - j\varepsilon''$, где действительная часть ε' представляет собой непосредственно диэлектрическую проницаемость, а мнимая ε'' – отражает потери. ε'' с некоторым допущением можно принять равным $E^2 \frac{\varepsilon_r tg\delta}{1,8 \cdot 10^{10}}$, где E – напряженность электрического поля, f – частота в сети, $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь. Здесь величина $g_0 = f \varepsilon_r tg\delta / (1,8 \cdot 10^{10})$ – удельная активная проводимость изоляции с параметрами ε_r и $tg\delta$. Способность диэлектрика создавать потери в переменном электрическом поле, характеризуемая произведением $\varepsilon_r tg\delta$, будем рассматривать как коэффициент диэлектрических потерь.

Показано, что в электропроводке, которая является носителем электрического поля, происходит рассеяние (диссипация) энергии. Рассеиваемая энергия за единицу времени рассматривается как диэлектрические потери, которые преобразуются в джоулево тепло, вызывая нагрев изоляции ЭП, вследствие чего ухудшаются её электрические свойства.

В переменном электрическом поле электропроводки можно выделить следующие виды диэлектрических потерь: потери на электропроводность, обусловленные током смещения; релаксационные потери, вызываемые поляризацией; ионизационные потери при наличии в диэлектрике воздушных или газовых включений. Для диэлектриков электропроводки, эксплуатирующихся в условиях повышенной влажности, характерно значительное ухудшение его поверхностного сопротивления. На основании проведенного анализа установлено, что на величину поверхностного сопротивления изоляции ЭП оказывают влияние следующие факторы: относительная влажность помещения, наличие агрессивной среды (химически активных веществ), температура, шероховатость и чистота поверхности электропровода, наличие водорастворимых примесей в

материале диэлектрика и его способность электризоваться, химический состав и структура диэлектрика.

Токоведущая система электропроводки (рис. 1) может быть представлена в виде n последовательно включенных отдельных элементов $\Delta\ell$ и единичных контактных переходов, конструктивно выполненных в виде клеммного соединения или «скрутки» в распределительных коробках. Многочисленные контактные соединения существенно снижают надежность и ресурс ЭП. Деградация электрического контакта, являясь потенциально «слабым звеном», протекает на основе диффузионного роста поверхностных пленок на границе соприкосновения двух контактных элементов. Возникающие процессы окисления и химические реакции образования сульфидов при агрессивной внешней среде приводят к постепенному росту поверхностной непроводящей пленки на границе контакта, увеличению активного сопротивления и температуры контактных соединений, снижению проводимости электрической цепи.

Рассмотрена кинетическая концепция, объясняющая физические механизмы старения и разрушения электротехнических материалов, в основе которой лежит признание того факта, что разрушение не может произойти мгновенно, и представляет собой процесс, протекающий во времени. Длительность этого процесса в конечном счете определяется временными характеристиками отдельных микроэлементов материала, находящихся в состоянии непрерывных тепловых колебаний. Эти колебания (дислокации) при воздействии внешних факторов вызывают диффузию (дрейф) в определенном направлении, которая с течением времени приводит к необратимым процессам, приводящим к разрушению изоляции и проводников ЭП.

Рассмотрены детерминистический и статистический подходы к оценке и прогнозированию остаточного ресурса электропроводки. Первый подход, используемый при сроке эксплуатации менее нормативного и незначительных дефектах, позволяет получить достаточно точные оценки показателей надежности. Второй – используется, если срок эксплуатации ЭП близок к нормативному или имеются значительные повреждения изоляции или токоведущих частей. В этом случае требуется определенная диагностика технического состояния, позволяющая получить прогноз, направленный на выявление остаточного ресурса электропроводки и возможности его увеличения.

Оценка работоспособности ЭП по результатам периодических обследований может осуществляться путем выявления повреждений, определения их величины и сопоставления с предельно допустимыми значениями повреждений. Критерии отказов и предельных состояний должны устанавливаться техническими условиями на электротехническую продукцию. Под критерием отказа понимается совокупность признаков, характеризующие неработоспособное состояние ЭП, при котором использование по назначению невозможно и должно быть прекращено. При этом изделие (электропроводка) должно быть заменено на новое. Отметим, что критерии предельных состояний ЭП могут быть как качественными (наличие трещин, износ, обугливание и др.), определяемые визу-

ально-оптическими способами, так и количественными, значения (интервал) которых устанавливается соответствующими нормами.

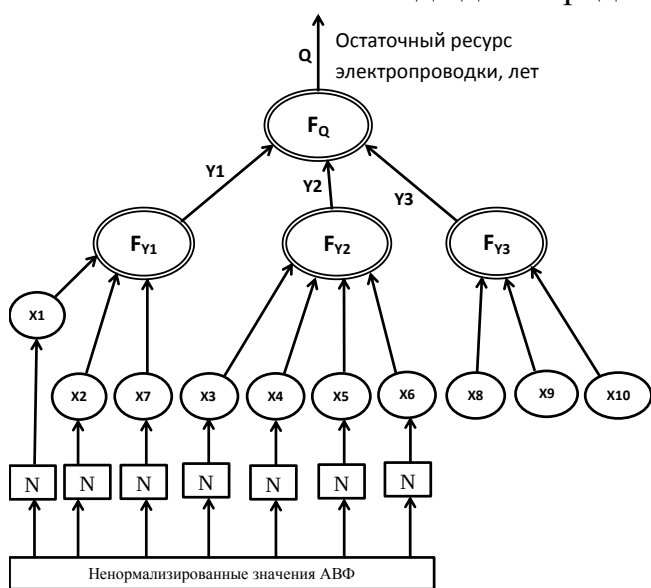
Большинство опубликованных работ по рассматриваемой проблематике посвящено диагностике асинхронных электродвигателей. Научные исследования по оценке остаточного ресурса электропроводки отсутствуют, что предопределило цель, поставленную в работе, и задачи, подлежащие решению.

Во второй главе разработан метод оценки и прогнозирования остаточного ресурса электропроводки (ОРЭП) в условиях неопределенности исходных данных и приведена его программная реализация, с помощью которой могут быть приняты управленческие решения по профилактике безопасности ЭП.

Концепция определения ОРЭП на основе нечеткой логики строится на предположении, что внешняя среда и режимные параметры влияют на ЭП, формируя рискообразующие факторы (РФ). Однако РФ нестабильны во времени, а потому наибольшей информативностью о состоянии электропроводки обладают результаты инструментального контроля ее состояния. Из контролируемых измерительными приборами диагностических параметров (ДП) формируют аппаратные влияющие факторы АВФ (табл. 2). АВФ представляют собой разнородную нечеткую информацию о техническом состоянии электропроводки, которую трудно интерпретировать, обрабатывать и трансформировать в виде остаточного ее ресурса.

Разработана система нечеткого логического вывода для определения ОРЭП на основе пакета Fuzzy Logic Toolbox о техническом состоянии ЭП. По результатам измерения АВФ формируется входной вектор $X^* = \{X_1^*, \dots, X_n^*\}$, соответствующий конкретному объекту, и направляется в систему нечеткого логического вывода, на выходе которой получают реальное значение ОРЭП.

На рис. 2 представлена разработанная иерархическая структурная схема нечеткого логического вывода для определения ОРЭП.



$F_{Y1}, F_{Y2}, F_{Y3}, F_Q$ – свертки АВФ, осуществляемые посредством логического вывода по нечетким базам знаний

Рис. 2 – Схема нечеткого логического вывода

Описание АВФ к рис. 2 представлено в табл. 2. В ней X_I – отношение либо $I_{нтрв}$ (номинального значения тока плавкой вставки предохранителя), либо $I_{нтрр}$ (номинального значения тока электромагнитного расцепителя автоматического выключателя), либо $I_{нтур}$ (значения уставки по току срабатывания расцепителя автоматического выключателя) к $I_{кз}$ – ожидаемо-

му току однофазного КЗ.

$X1$ не должно быть меньше 3; $X2$ не должно быть меньше 1,1; $X3$ - $X6$ не должно быть меньше 500 кОм; $X7$ - не более 4 Ом. При этом учитывается суммарное сопротивление контактов на основе переходных сопротивлений контактов и проводников.

$X8$ не должно быть больше 30 мА, $X9$ - исходя из того, что если коэффициент поляризации $K_{пол} < 1$ - изоляция является опасной; если $K_{пол} = 1 \dots 4$ - нормальной; если $K_{пол} > 4$ - превосходной; $X10$ - исходя из того, что если коэффициент абсорбции $K_{абс} < 1,25$ - изоляция является несоответствующей, если $K_{абс} < 1,6$ - хорошей, если $K_{абс} > 1,6$ - превосходной. При отсутствии каких-либо данных по $X1$ - $X10$ для четких факторов выбирают 0 или 'С' (после нормализатора), а для нечетких факторов выбирают среднее значение от диапазона, а при наличии нескольких значений для каждого из $X1$ - $X10$ в качестве влияющего на ОРЭП фактора принимают наихудшее значение.

Таблица 2 – Совокупность факторов

Обозначение АВФ	Описание АВФ [диапазоны АВФ, измеряемых ($X3$ - $X10$) приборами МІС-1000, МРІ-525, мультиметром Prova и вычисляемых ($X1$, $X2$) на основе измерений]
N	Нормализатор
$X1$	В зависимости от конкретного исполнения электропроводки - либо $I_{нтпв} / I_{кз}$, либо $I_{нтпр} / I_{кз}$, либо $I_{нтур} / I_{кз}$ [от 1/3 до 0]
$X2$	Отношение верхнего значения тока срабатывания мгновенно действующего расцепителя (отсечки) к ожидаемому току однофазного КЗ [от 1/1,1 до 0]
$X3$	Полное сопротивление изоляции цепи «фаза — ноль» [от 1,72 МОм до 22,7 МОм]
$X4$	Полное сопротивление изоляции цепи «фаза — фаза» [от 1,72 МОм до 22,7 МОм]
$X5$	Полное сопротивление изоляции цепи «фаза — защитный проводник» [от 1,72 МОм до 22,7 МОм]
$X6$	Полное сопротивление изоляции цепи «фаза — защитный проводник» без срабатывания УЗО [от 1,72 МОм до 22,7 МОм]
$X7$	Сопротивление заземляющих устройств [от 0,01 Ом до 4 Ом (меньшие значения $X7$ соответствуют более высокому качеству электропроводки)]
$X8$	Дифференциальный ток утечки на землю [от 0 до 30 мА]
$X9$	Качество изоляции по коэффициенту поляризации [изоляция: плохая (Н,-50), хорошая (С,0) и превосходная (В,50)]
$X10$	Качество изоляции по коэффициенту абсорбции [изоляция: плохая (Н,-50), хорошая (С,0) и превосходная (В,50)]
$Y1$, $Y2$, $Y3$	Промежуточные переменные - промежуточные корни дерева
Q	Выходная переменная - корень дерева – ОРЭП

В таблице 2 обозначения в скобках вида (Н,-50), (С,0), (В,50) соответствуют вводимым в программу нечеткой логики термам (Н-низкий, С-средний, В-высокий), либо соответствующим им числам (-50, 0, 50), поскольку допускается и то и другое, кроме того, для $X3$ - $X6$ при значениях от 0,5 Мом до 1,72 Мом принимают 1,72 Мом, при значениях от 22,7 Мом и выше принимают 22,7 Мом.

Связь F между входными переменными X_j и выходными переменными Y , Q описывается системой соотношений:

$$Y_1 = F_{Y1}(X_1, X_2, X_7), \quad (2)$$

$$Y_2 = F_{Y2}(X_3, X_4, X_5, X_6), \quad (3)$$

$$Y_3 = F_{Y3}(X_8, X_9, X_{10}), \quad (4)$$

$$Q = F_Q(Y_1, Y_2, Y_3), \quad (5)$$

$$Q \in [0,30]. \quad (6)$$

Соотношения (2) по (6) соответствуют базе знаний, состоящей из логических высказываний о взаимодействии входных X_i и выходных переменных Y_1, Y_2, Y_3, Q . При разработке баз знаний использованы:

- известная кинетическая модель старения и разрушения ЭП в зависимости от времени эксплуатации (рис. 5);

- полученные в результате экспериментальных исследований усредненные зависимости изменения сопротивления изоляции, дифференциального тока утечки на землю, коэффициентов поляризации и абсорбции ЭП от срока ее эксплуатации.

При переходе к зависимостям в терминах нечеткой логики производилась:

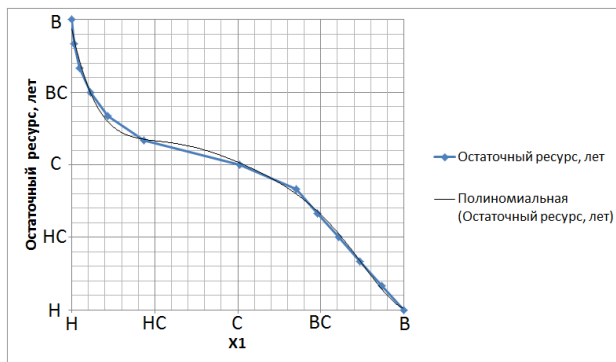
- инверсия исходных данных по оси времени (переносом наименьшего времени на место наибольшего, второго по величине времени – на место предпоследнего, и т.д.), то есть - переход от времени эксплуатации к остаточному ресурсу;

- инверсия осей – ОРЭП - по оси ординат, а АВФ - по оси абсцисс;

- замена имеющегося числа точек с четкими данными по осям в исходных зависимостях на 5 точек (средствами редактора Excel);

- замена получаемых 5-ти точек с четкими данными по осям на Н – низкое, НС – ниже среднего, С – среднее, ВС – выше среднего, В – высокое значение влияющего фактора.

Полученные зависимости использовались при разработке соответствующих нечетких баз знаний. Так, кинетическую модель ЭП от времени эксплуатации (рис. 5), в терминах нечеткой логики для переменной Y_1 можно представить (рис. 3).



Н – низкое, НС – ниже среднего, С – среднее, ВС – выше среднего, В – высокое значение влияющего фактора X_1, X_2, X_7 (в четких числах -50, -25, 0, 25 и 50 соответственно)

Рис. 3 - К формированию базы знаний для моделирования переменной Y_1

Разработанную нечеткую базу знаний о влиянии факторов $X_1, \dots, X_{10}$ на параметры Y_1, Y_2, Y_3 представим в более общем виде:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} [\bigcap_{i=1}^n (X_i = a_i^{jp})] \rightarrow Y = d_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (7)$$

где a_i^{jp} - нечеткий терм, которым оценивается переменная X_i в строчке с номером jp ($p = \overline{1, k_j}$); k_j - количество строчек-конъюнкций, в которых выход Y оценивается нечетким термом d_j ($k_j = 5$), $j = \overline{1, m}$; m - количество термов, ис-

пользуемых для лингвистической оценки выходного параметра Y ($m = 5$); $i = \overline{1, n}$; $n = 10$ – число АВФ (рис. 2); $\cup$ - операция ИЛИ; $\cap$ - операция И.

Уравнению (7) соответствуют нечеткие логические уравнения, связывающие функции принадлежности нечетких термов входных и выходных переменных. То есть степень принадлежности $\mu^{d_j}(X^*)$ входного вектора $X^* = \{X_1^*, \dots, X_n^*\}$ нечетким термам d_j из базы знаний (7) на основе известных соотношений можно записать в виде:

$$\mu^{d_j}(X^*) = \max_{p=1, k_j} \min_{i=1, n} [\mu^{j_p}(X_i^*)], \quad j = \overline{1, m}. \quad (8)$$

При работе системы (рис. 2) нечеткое множество $\tilde{Q}$, соответствующее входному вектору X^* , определяется на основе соотношения:

$$\tilde{Q} = \frac{\cup_{j=1, m} \int_{\tilde{Q}} \min(\mu^{d_j}(X^*), \mu^{d_j}(Q))}{Q}, \quad (9)$$

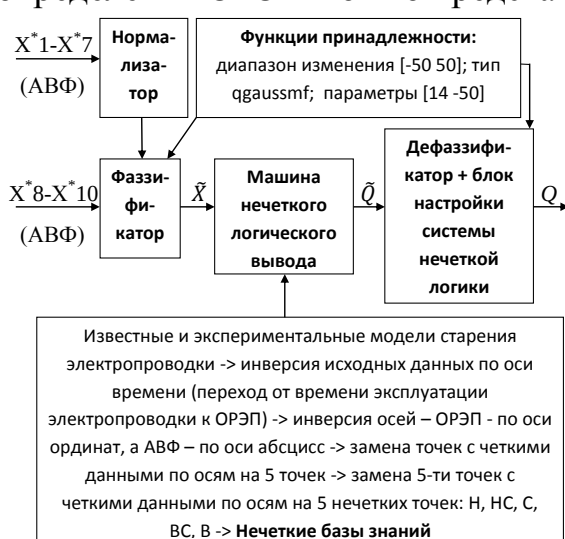
где $\cup$ – операция объединения нечетких множеств; $\mu^{d_j}(Q)$ - функция принадлежности выхода Q нечеткому терму d_j , $j = \overline{1, m}$.

Четкое значение выхода Q , соответствующее входному вектору X^* , определяется в результате дефаззификации (преобразования нечеткого множества в четкое число) нечеткого множества $\tilde{Q}$. Применяется известная дефаззификация по методу центра тяжести:

$$Q = \frac{\int_{\tilde{Q}} Q \mu_{\tilde{Q}}(Q) dQ}{\int_{\tilde{Q}} \mu_{\tilde{Q}}(Q) dQ}, \quad (10)$$

где $\mu_{\tilde{Q}}(Q)$ – степень принадлежности выходного вектора $\tilde{Q}$ его нечетким термам, Q - ОРЭП в годах (рис. 2).

Предложенная схема формирования базы знаний, отображающая взаимосвязь между входными переменными ($X1 - X10$) и выходной Q , позволяет по результатам измерений параметров электропроводки и соответствующей базы знаний (7) оценить техническое состояние ЭП и определить ее остаточный ресурс Q . Тогда нечеткий логический вывод системы нечеткой логики (СНЛ) для определения ОРЭП можно представить (рис. 4).



X^*1-X^*7 - реальные четкие (X^*8-X^*10 - нечеткие) АВФ, соответствующие конкретному зданию, полученным измерениями с помощью приборов; Н – низкое, NS – ниже среднего, С – среднее, В – выше среднего, В – высокое значение АВФ; $\tilde{X}$ - вектор нечетких множеств, соответствующий входному вектору X^* ; $\tilde{Q}$ - результат логического вывода в виде вектора нечетких множеств; Q - выходной четкий вектор – ОРЭП, лет

Рис. 4 - Нечеткий логический вывод СНЛ

Таким образом, преобразование информации от АВФ ($X1-X10$) в остаточный ресурс Q происходит по алгоритму:

- измеряют значения АВФ X^*_1 - X^*_{10} и печатают их в командном окне Matlab на место соответствующих значений X^*_1 - X^*_{10} строки `consc` (X^*_1 , X^*_2 , X^*_7 , X^*_3 , X^*_4 , X^*_5 , X^*_6 , X^*_8 , X^*_9 , X^*_{10}), где функция `consc.m` представляет собой разработанную программу, управляющую работой всей системы нечеткого логического вывода для ОРЭП, а АВФ X^*_1 , X^*_2 , X^*_7 , X^*_3 , X^*_4 , X^*_5 , X^*_6 предварительно пропускают через разработанный соответствующий нормализатор;

- в командном окне Matlab исполняют программу `consc.m` с использованием функций принадлежности, предварительно подобранных для каждой АВФ X_1 , X_2 , X_7 , X_3 , X_4 , X_5 , X_6 , X_8 , X_8 , X_{10} в FuzzyLogic системы Matlab, с участием ее компонентов (фаззификатора, машины нечеткого логического вывода, дефаззификатора), разработанных нечетких баз знаний и разработанного блока настройки системы нечеткой логики;

- в результате нечеткого логического преобразования АВФ X^*_1 , X^*_2 , X^*_7 , X^*_3 , X^*_4 , X^*_5 , X^*_6 , X^*_8 , X^*_9 , X^*_{10} в командном окне Matlab на основе соотношений (2) - (10) получают ОРЭП, в годах.

Система нечеткой логики (рис. 2) спроектирована на работу с АВФ X_1 - X_{10} в диапазоне от -50 до 50 (в процентах отклонения от номинального значения АВФ), а измеренные значения четких АВФ согласно табл. 2 изменяются в различных пределах, поэтому использован дополнительный `m` – файл – нормализатор (скрипт). Для представления ОРЭП в годах разработан порядок настройки СНЛ Мамдани. При этом уравнение в конце скрипта `consc.m` с учетом функции округления *round* должно быть записано в виде:

$$Q = \text{round}((Q_{\text{тек}} - Q_{\text{min}}) * T / (Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}})), \quad (11)$$

где Q – ОРЭП в годах; T – максимальный срок службы ЭП (лет) (принимается на основе действующих нормативных материалов для различных зданий); $Q_{\text{тек}}$ – текущее значение ОРЭП; Q_{min} – значение ОРЭП при минимальных АВФ; Q_{max} – значение ОРЭП при максимальных АВФ.

Результаты модельных экспериментов по определению ОРЭП подтвердили:

- максимальный ОРЭП (30 лет), при наилучших значениях АВФ;
- минимальный ОРЭП (0 лет), при наихудших значениях АВФ;
- средний ОРЭП (17 лет), при средних значениях АВФ.

Разработанный метод расчета изложен в «Методических рекомендациях». Результаты обследования фермы КРС на 400 голов СПК «Суетский» Суетского района Алтайского края на предмет определения ОРЭП свидетельствуют о том, что наибольший ОРЭП имеет родильная на 48 голов (21 год), ОРЭП телятника на 164 головы составляет 14 лет, а ОРЭП коровника на 400 голов равен 12 лет, что удовлетворительно согласуется с результатами экспертного обследования упомянутых объектов.

В третьей главе выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, целью которых является оценка технического состояния электропроводки производственных зданий и объектов инфраструктуры сельских населенных пунктов.

Дано обоснование выбора диагностических параметров. Приведена методика экспериментальных исследований, рассмотрен аппаратно-программный комплекс для сбора и анализа статистических данных о состоянии электропроводки. Установлены корреляционно-регрессионные зависимости между диагностическими параметрами и характеристиками внешней среды.

Сбор информации о техническом состоянии ЭП связан со значительными затратами. Поэтому задачей явилось получение необходимых данных при минимальных затратах путем планирования эксперимента и использования методов математической статистики. Основным здесь является определение минимально необходимого количества измерений ДП, статистическая проверка гипотезы о законе распределения случайной величины и установление взаимосвязи между диагностическими параметрами и рискообразующими факторами.

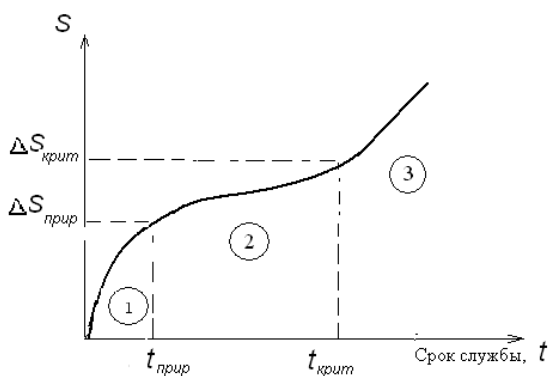
Процесс старения электропроводки может быть представлен в виде зависимости

$$S = f(t), \quad (12)$$

где S - старение ЭП (вероятность безотказной работы $Q_0(t)$, параметр потока отказов $\lambda(t)$ и т.д.).

В качестве показателя старения могут быть приняты: скорость изменения $\alpha = \frac{dS}{dt}$ - отношение величины старения ко времени, в течение которого оно возникло; интенсивность старения $\beta = \frac{dS}{dl}$ - отношение величины старения к элементу длины электропроводки Δl , который подвергается процессу старения.

Представим кинетическую модель $S(t)$ старения и разрушения электропроводки объекта в зависимости от времени эксплуатации (рис. 5)



1- область приработки; 2- область стабилизации; 3- область разрушения

Рис. 5 – Кривая старения и разрушения ЭП

Выделим три характерных периода. В первом начальном периоде эксплуатации (период приработки) функция $S(t)$ возрастает монотонно по экспоненте. В конце периода происходит замедление роста и наступает второй период, когда функция $S(t)$ становится почти линейной — наблюдается стабильная интенсивность старения ($\beta = \text{const}$). В третьем периоде по мере накопления повреждений скорость α начинает увеличиваться до полного разрушения (отказа). Относительная продолжительность этого периода в зависимости от условий эксплуатации при разных видах разрушений может быть различной. Так, при высокой влажности, резких колебаниях температуры и наличии агрессивной среды (животноводческие помещения) процесс разрушения ЭП является более интенсивным и первый период (инкубационный, когда происходит накопление повреждений) может перейти сразу в третий. При определенных условиях (в случае умеренных

воздействий факторов внешней среды или нормального технического обслуживания электроустановок) третий период может отсутствовать (электроустановка снимается с эксплуатации до возникновения отказа).

Показано, что предельное состояние электропроводки определяется некоторыми численными значениями диагностических параметров (ДП), характеризующих изоляционные и токопроводящие её свойства. В качестве ДП приняты:

- для изоляции ЭП: сопротивление изоляции ($R_{из}$); ток утечки на землю ($I_{ут}$); коэффициент абсорбции ($K_{аб}$); коэффициент поляризации ($K_{пол}$).

- для проводников ЭП: сопротивление целостности электрической цепи ($R_{ц}$); активное сопротивление контактных соединений ($R_{конт}$); температуру переходных сопротивлений ($T_{пер}^0$); сопротивление цепи «фаза-ноль» ($R_{ф-0}$).

Целью экспериментальных исследований является подтверждение теоретических моделей оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электропроводки в условиях неопределенности, а также определение закономерностей изменения диагностических параметров ЭП от факторов внешней среды.

При выборе факторов, влияющих на значения диагностических параметров ($R_{из}$, $I_{ут}$, $K_{аб}$, $K_{пол}$), учитывались: назначения объекта, марка провода и способ прокладки, температура и относительная влажность помещения, срок эксплуатации электропроводки.

Были обследованы производственные здания, животноводческие объекты и жилые дома в сельских поселениях Алтайского края.

Рассматривались электропроводки (алюминиевые и медные) с поливинилхлоридной изоляцией. Учитывались следующие виды электрической нагрузки: электродвигательная, электротермическая и осветительная.

Для измерения диагностических параметров ЭП и характеристик микроклимата помещений использовалась система измерительных приборов (универсальное диагностирующее устройство МИС-1000, токовые клещи – мультиметр переменного тока Prova и др.).

Целью статистической обработки результатов измерений является определение законов распределения ДП и их числовых оценок, построение уравнений регрессии и определение коэффициентов корреляции, позволяющие установить причинно-следственные связи между ДП и признаками, характеризующими их численное значение.

Выполненная в работе статистическая обработка результатов измерений включает: обоснование объема выборки и оценку её однородности, определение коэффициентов вариации, выбор доверительной вероятности относительной погрешности измерений.

Формализованное описание процесса старения изоляции и токоведущей части электропроводки может быть представлено в общем виде структурной схемой влияния факторов на формирование значений ряда $S(t)$ в виде следующего разложения:

$$S(t) = F_{mp}(t) + \sum_{k=1}^n a_k f_k(t) + z(t), \quad (13)$$

где $F_{mp}(t)$ – функция тренда, обусловленная физической природой процесса старения ЭП, характеризующая тенденцию (динамику изменения) диагностического параметра $S(t)$; $f_k(t)$ – функция, формирующая изменение диагностического параметра, обусловленное действием k -го фактора; $z(t)$ – результат воздействия случайных факторов, не поддающихся учету и оценке; a_k – коэффициент, принимающий значение 1 или 0, в зависимости от того, участвует ли в формировании значений $S(t)$ k -ый фактор. Вывод об учете k -го фактора в формировании значений $S(t)$ принимается экспертом на основании статистического анализа диагностических параметров.

Основываясь на разложении (13), можно дать общую формулировку задачи построения модели процесса старения ЭП: по имеющейся траектории $S(t_1)$, $S(t_2)$, ..., $S(t_m)$ анализируемого ряда $S(t)$ требуется обосновать модель, адекватно описывающую функции $f_k(t)$, присутствующие в разложении, а также определить значения параметров a_k .

Показана возможность построения тренда по выражению (13) применительно к любому диагностическому параметру, описывающему процесс старения изоляции и токоведущей части электропроводки.

Для построения математической модели диагностического параметра ЭП в зависимости от факторов внешней среды была принята функция вида

$$M[(ДП)] = \theta(t^0, V, T, \alpha, \beta, \gamma), \quad (14)$$

где $M[(ДП)]$ – математическое ожидание диагностического параметра при соответствующих значениях контролируемых переменных; t^0 – температура помещения, V – относительная влажность; T – срок эксплуатации электропроводки; α , β , γ – коэффициенты, определение которых составляет цель эксперимента.

Полученные в диссертации уравнения регрессии позволяют достаточно точно прогнозировать k -ый диагностический параметр, что подтверждается высокими значениями множественных коэффициентов детерминизации и коэффициентов корреляции. Их значения свидетельствуют об адекватном выборе совокупности факторов, влияющих на величину определенного диагностического параметра.

В четвертой главе изложены общие принципы снижения риска обслуживания электропроводки, рассмотрен вероятностно-статистический метод оценки опасности и обоснованы требования к системе электрической и противопожарной защиты ЭП, сформулирован подход к оптимизации интегрированного риска ЭП.

Комплекс задач, решение которых направлено на создание системы оптимального обслуживания электропроводок сельскохозяйственных объектов, представлен на рис. 6.

Рассмотрены основные требования, предъявляемые к электропроводкам зданий, содержащиеся в отечественных нормативных документах и стандартах

Международной электротехнической комиссии. Суть этих требований сводится к тому, чтобы электропроводки, эксплуатирующиеся в нормальных условиях или при возникновении аварийных режимов (коротких замыканий и электрических перегрузок), не явились причиной электротравматизма людей, возникновения пожара, гибели или электропатологии животных. Наиболее пожароопасными режимами следует считать короткие замыкания и перегрузки в электропроводке. Пожарная опасность КЗ проявляется в виде теплового эффекта от воздействия на проводник сопротивления тока $i_{кз}$ за время $t_{кз}$, определяемого интегралом $\int_0^t i_{кз}^2 r dt$. Причем причиной КЗ могут быть не только внутренние факторы, но и внешние, например, температура пожара. Кроме того, в момент КЗ возникает электрическая дуга, которая также может приводить к воспламенению расположенных вблизи горючих материалов.



Рис. 6 – Задачи оптимизации обслуживания ЭП

Электрическая перегрузка относится к аварийному пожароопасному режиму, возникающему вследствие неправильного выбора, включения или повреждения потребителей, в результате чего проходящий по цепи суммарный рабочий ток превышает его номинальное значение. Внешним признаком перегрузки электропроводки является её перегрев, приводящий к тепловому старению изоляции и её преждевременному выходу из строя. Пожарная безопасность ЭП при перегрузках, как и в случае КЗ, зависит от многих общих факторов; отличием режима перегрузки от КЗ с точки зрения пожарной опасности является отсутствие выделения части расплавленного металла токопроводящих жил проводников.

Рассмотрена электрическая и пожарная опасность предаварийных режимов ЭП. Воздействие влаги и агрессивной среды животноводческих помещений, оседание электропроводящей пыли на изоляцию проводов, механические повреждения изоляции приводят к появлению поверхностных токов утечки. От возникающего при этом тепла накопленная в ЭП влага испаряется, причем на поверхности изоляции остается слой соли. При прекращении испарения влаги ток утечки исчезает. Этот процесс является циклическим и при многократном его повторении возникает устойчивый ток утечки через изоляцию на землю. Появление такого тока приводит к дуговым поверхностным разрядам, частичным пробоям изоляции и неполным КЗ.

Приведенный в работе анализ предаварийных режимов ЭП показал, что они являются не менее опасными, чем сами аварии в электроустановках. Возникающий пробой изоляции приводит к появлению опасного электрического потенциала на металлоконструкциях технологического оборудования и его выносу по PEN-проводникам на сторонние объекты. Эти потенциалы могут быть сколь угодно долго и при прикосновении токопроводящих частей человек попадает под опасное напряжение прикосновения U_{np} и может получить электротравму.

При неполных КЗ, обусловленных токами утечки, в точке повреждения имеется определенное переходное сопротивление, в котором может выделяться значительное количество тепловой энергии, приводящей к воспламенению изоляции ЭП даже при правильно выбранной электрической защите. Протекающий ток утечки по PEN-проводникам или в случае попадания человека под U_{np} является недостаточным для срабатывания защиты, например, автоматического выключателя. Однако величина этого тока вполне достаточна, чтобы вызвать электропоражение человека или привести к пожару.

Обоснованы требованиями обеспечения безопасности электропроводки. Основными из них являются:

1. Токоведущие части ЭП не должны быть опасными при случайном прямом прикосновении к ним человека в нормальном режиме работы.

2. Токи проводников ЭП и металлических частей электрооборудования, а также токи утечки на землю не должны превышать предельно допустимых значений (в соответствии с критериями безопасности и с учетом длительности нагрева ЭП) при всех режимах работы электропроводки.

3. Для защиты от электротравм людей, предотвращения электропатологии животных и пожаров должна применяться основная, вспомогательная и дополнительная защита при прямом прикосновении токоведущих частей и токопроводящих металлических конструкций, включая PEN-проводники, в нормальном, предаварийном и аварийном режимах (табл. 3).

В качестве основной защиты могут быть использованы: изоляция, соответствующая минимальному испытательному напряжению; усиленная и двойная изоляция. Для вспомогательной защиты используются: зануление (системы TN-C, TN-C-S, TN-S); двойная изоляция; защитное заземление, в том числе повторное; уравнивание потенциалов; электрическое разделение цепей; автоматиче-

ское отключение, в том числе с применением защиты от сверхтоков и защиты, реагирующей на дифференциальный ток с номинальным отключающим током, не превышающим 30 мА (для обеспечения электробезопасности), и не превышающим 100 мА (для обеспечения пожарной безопасности).

Таблица 3 – Рекомендации по применению электрической защиты в зависимости от режима ЭП

Режим работы ЭП	Вид защиты		
	Основная	Вспомогательная	Дополнительная
Нормальный эксплуатационный	+	-	+
Предаварийный (старение, деградация)	+	+	+
Аварийный	+	-	+

В качестве дополнительной защиты должны быть применены устройства защитного отключения с номинальным отключающим дифференциальным током 6 мА или 30 мА.

Рассмотрен вероятностно-статистический метод оценки и прогнозирования риска опасности электропроводки

$$R = \sum_i^n p_i y_i, \quad (15)$$

если имеет место n опасных событий i с различными вероятностями p_i и соответствующим им ущербом y_i , в течение одного года.

Введено обобщенное понятие «опасность электропроводки», под которым следует понимать сумму вероятностей возникновения пожара и электротравматизма человека. В свою очередь вероятность возникновения пожара электропроводки

$$P_{п.эп} = P_{а.р.} * P_{н.з.} * P_{н.з.}, \quad (16)$$

где $P_{а.р.}$ – вероятность возникновения аварийного режима (короткое замыкание, перегрузка, высокое переходное сопротивление и т.п.); $P_{н.з.}$ – вероятность того, что величина характерного пожароопасного фактора (тока, переходного сопротивления и т.д.) лежит в диапазоне пожароопасных значений; $P_{н.з.}$ – вероятность неисправности или неправильного выбора (загрубления) защиты (электромагнитной, тепловой и т.п.).

Вероятность электротравмы человека от электропроводки

$$P_{эл.} = P_{пр.} * P_{неот.} * P_{н.з.}, \quad (17)$$

где $P_{пр.}$ – вероятность прикосновения к токоведущему элементу (прямой контакт) или токопроводящему корпусу электрооборудования (косвенный контакт), на котором находится занесенный опасный электрический потенциал в результате повреждения изоляции ЭП; $P_{неот.}$ – вероятность возникновения эффекта неотпускания, проявляющаяся в невозможности самостоятельно разжать ладонь, охватывающую токоведущий контакт; $P_{н.з.}$ – то же (см. (16)).

Полная вероятность опасности электропроводки на объекте при ее обслуживании за время T (1 год) в общем виде

$$P_n = \sum_{i=1}^m \prod_{j=1}^n [P_{оп}(\text{ЭП})_{ij}], \quad (18)$$

где i – фактор опасности ЭП (электротравма, пожар, отказ и др.); j – элемент ($\Delta\ell$) электропроводки на объекте (между двумя клеммными соединениями).

Рассмотренный метод позволяет установить количественную связь между влияющими на техногенную опасность ЭП ряда определенных параметров, исходя из совместности событий. Получение информации о надежности, вероятностей возникновения отказов и аварийных режимов ЭП достигается либо путем сбора и анализа статистических данных по результатам производственной эксплуатации электроустановок, либо методом экспертных оценок.

Рассмотрена задача оптимизации безопасности ЭП: в качестве критерия предложен показатель риска R , представляющий собой мультипликативную характеристику, отражающую как вероятности возникновения техногенных опасностей (электротравма и пожар), так и их последствия, выраженные в денежном эквиваленте.

Определение материальных потерь, связанных с электротравматизмом людей, объективно связано с оценкой стоимости среднестатистической жизни человека (ССЖЧ). Признавая приоритет жизни и здоровья отдельного человека, нельзя игнорировать тот факт, что многочисленные случаи электротравм, гибели людей в ДТП и т.д. приносят огромные материальные потери обществу, выражающиеся недо вкладом среднедушевого дохода в ВВП. Показано, что суммарные экономические затраты, связанные с обеспечением техногенной безопасности в электроустановках, состоят из затрат на создание систем технических средств электрозащиты и денежного эквивалента, представляющего сумму всех материальных ущербов. Очевидно, что чем больше ущерб от электротравматизма, тем больше требуется материальных затрат на их предотвращение и обеспечение приемлемого риска. Поэтому существует оптимум уровня риска, установлению которого предшествует экономический анализ (рис.7).

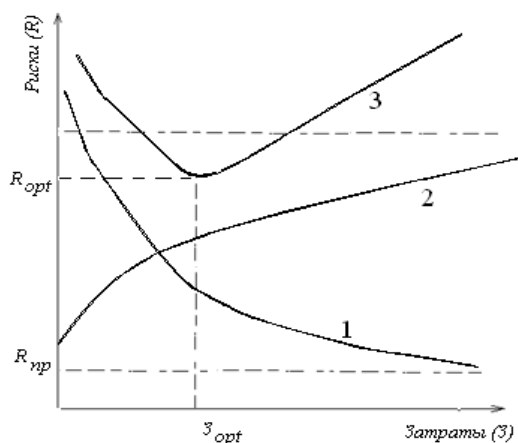


Рис. 7 – К обоснованию оптимального уровня интегрированного риска

Кривая 1 – устанавливает связь между затратами $Z_{сб}$ и риском $R_{полн}$ (здесь отмечено предельное значение риска R_{np} , при котором дальнейшее его снижение нецелесообразно по экономическим соображениям).

Кривая 2 – характеризует нелинейную функцию между $R_{полн}$ и полным ущербом $U_{полн}$.

Кривая 3 – отражает зависимость $R_{полн} = f(Z_{сб} + U_{полн})$, которая показывает четко выраженный оптимум, определяющий экономическую целесообразность материальных затрат на систему безопасности (СБ). Точка экстремума функции $R(Z_{сб} + U_{полн})$, определяет равенство материальных расходов на обеспечение безопасно-

сти и материальных ущербов, которые следует ожидать при заданном уровне риска.

Рассмотрены следующие математические постановки задачи оптимизации:

$$R_{\text{полн}} = \sum_i^n P_{\text{полн}_i} \cdot Y_{\text{полн}_i} \rightarrow \min, \text{ при } Z_{\text{полн}} \leq Z_{\text{полн}_0}, \quad (19)$$

где $Z_{\text{полн}_0}$ - заданные затраты.

$$Z_{\text{полн}} \rightarrow \min, \text{ при } R_{\text{полн}} \leq R_0, \quad (20)$$

где R_0 - заданный (нормативный - $1 \cdot 10^{-6}$) уровень риска.

Принята вторая задача оптимизации $R_{\text{полн}}$ (20), сводящаяся к минимизации всех материальных затрат, связанных с созданием СБ, направленной на снижение риска, и ущербов, вызванных электротравматизмом людей, пожарами и электропатологией животных.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Сложившаяся в сельскохозяйственной отрасли система обслуживания электропроводки зданий и сооружений не отвечает современным требованиям надежности и безопасности. Электропроводка, основной функцией которой служит непосредственная передача электроэнергии потребителям, является наиболее распространенным и опасным видом электротехнических изделий (здесь происходит подавляющее количество отказов и аварий, приводящих к перерывам электроснабжения, электротравматизму людей, сельскохозяйственных животных, возникновению пожаров).

2. Регламентируемые нормы обслуживания ЭП ограничиваются периодическим измерением сопротивления изоляции и визуальными осмотрами, что является недостаточным для объективной оценки технического состояния электропроводки. Существующие методы контроля ТС не позволяют определить остаточный ресурс ЭП, тем самым своевременно принимать решения, направленные на предотвращение угроз техногенного характера. Разработанная концепция оценки и прогнозирования остаточного ресурса электропроводки, в основе которой лежит многопараметрическая модель процесса изменения свойств изоляционной и проводниковой частей ЭП, предполагает наряду с параметрами надежности учет критериев риска, включающих компоненты безопасности и экономичности. Реализация выдвинутой в диссертации концепции требует совершенствования методов прогнозирования остаточного ресурса и оценки риска эксплуатации электропроводки.

3. Техническое состояние электропроводки следует оценивать совокупностью диагностических параметров, характеризующих изоляционные и токоведущие свойства ЭП. Прогнозирование остаточного ресурса с целью продления срока безопасной эксплуатации ЭП предложено проводить, используя более точный статистический метод, основанный на вероятностных оценках диагностических параметров.

4. Разработан метод оценки остаточного ресурса, позволяющий с помощью нечеткой логики прогнозировать техническое состояние ЭП по диагностическим параметрам до достижения их критических значений. Метод является основой для анализа рисков при эксплуатации электроустановок и оптимизации системы безопасности. Практическую реализацию разработанного метода обеспечивает алгоритм оценки остаточного ресурса ЭП, позволяющий в реальных условиях эксплуатации прогнозировать ее критическое состояние, тем самым повысить эффективность технического диагностирования электропроводки. Изложенный метод позволяет оценивать ОРЭП вне зависимости от времени эксплуатации ЭП от момента ввода ее в эксплуатацию до момента текущего контроля, что соответствует стратегии технического обслуживания электроустановок по реальной потребности.

5. На основании экспериментальных исследований построены математические модели рискообразующих факторов воздействия электрического и теплового полей, параметров

внешней среды на процесс старения ЭП. Получены статистические распределения диагностических параметров и подтверждена адекватность теоретической модели ресурса электропроводки опытным данным.

6. Разработанный статистический метод оценки техногенного риска ЭП позволяет получить объективную информацию о надежности работы электроустановки (определить критерии отказов, влияющих на электрическую и пожарную опасность, вероятности возникновения аварийных режимов, электротравм и пожаров).

7. Обоснованы требования к созданию системы техногенной безопасности ЭП, представляющей совокупность основных, вспомогательных и дополнительных мер в сочетании с диагностикой технического состояния электропроводки. Реализация предложенных мер позволяет существенно снизить риски опасности электропроводок и достичь нормативного уровня ($1 \cdot 10^{-6}$).

8. Разработан метод оптимизации системы безопасности ЭП, в качестве критерия которой предложен показатель интегрированного риска R_{Σ} , представляющий собой мультипликативную характеристику, отражающую как вероятность возникновения техногенных опасностей, так и последствия, выраженные в денежном эквиваленте. Оптимизация СБ состоит в минимизации полных затрат $Z_{\text{полн}}$, включающих затраты на создание системы безопасности и материальные потери, вызванные электротравматизмом и пожарами.

Методический подход к оптимизации риска является общим и может служить основой для проектирования безопасных электроустановок 380/220 В.

9. Социально-экономическая эффективность разработанного метода оценки и прогнозирования остаточного ресурса ЭП выражается в повышении качественных и количественных показателей функционирования сельскохозяйственных электроустановок. Социальный эффект достигается путем снижения риска электропоражений людей и улучшения охраны труда и техники безопасности. К факторам экономического эффекта следует отнести: предотвращение аварийных ситуаций, снижения рисков пожаров и электропоражения животных, продление ресурса ЭП и исключение неоправданных работ, а также сокращение времени простоев технологического оборудования.

Разработаны предложения по внесению поправок в действующие нормативные документы (ПУЭ, ПТЭЭП) в части повышения эффективности технического диагностирования электропроводки.

Список основных публикаций по теме диссертационной работы: в изданиях по перечню ВАК

1. **Гончаренко, Г.А.** Физические основы старения и повреждения электропроводки зданий / Г.А. Гончаренко // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2012. - № 4. – С. 147 - 152.

2. **Гончаренко, Г.А.** Концепция оценки остаточного ресурса электропроводки и алгоритм его определения / Г. А. Гончаренко, О. К. Никольский // Вестник КрасГАУ. - Красноярск, 2013. - № 9. - С. 210-214.

3. **Гончаренко, Г.А.** Математическая модель травмоопасных ситуаций в электрических сетях 0,4 кВ / Г. А. Гончаренко, О.К. Никольский, Н.И. Черкасова // Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2013. - № 8. - С. 198-202.

4. **Гончаренко, Г.А.** Математическое моделирование технического состояния электропроводки сельскохозяйственных объектов/ Г.А. Гончаренко // Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2013. - № 10. - С. 240-243.

5. **Гончаренко, Г.А.** Вероятностно-статистический метод оценки и оптимизации риска опасности электропроводки сельскохозяйственных зданий и сооружений /Г.А. Гончаренко // Вестник алтайской науки. – Барнаул, 2013. - № 2/2. - С. 264-267.

6. **Гончаренко, Г.А.** Обеспечение комплексной безопасности электроустановок зданий / Г.А. Гончаренко // Вестник алтайской науки. – Барнаул, 2013. - № 2/2.- С. 268-271.

7. **Гончаренко, Г.А.** Обоснование выбора диагностических параметров электропроводки / Г.А. Гончаренко // Вестник алтайской науки. – Барнаул, 2013. - № 2/2.- С. 260-264.

в других изданиях

8. **Гончаренко, Г.А.** Методика оценки технического состояния электропроводки зданий / Г.А. Гончаренко, О. К. Никольский // Электробезопасность. - Челябинск, 2012. - № 4. - С. 22-26.

9. **Гончаренко, Г.А.** Моделирование рисков опасности от состояния электропроводки зданий / Н.П. Воробьев, Г.А. Гончаренко, Е.Ю. Рыжикова Е.Ю. // XI Международная научно-практическая интернет-конференция " Энерго- и ресурсосбережение - XXI век ", г. Орел, 15 марта по 30 июня 2013 г./ Секция № 1. Проблемы энергоресурсосбережения и безопасной эксплуатации зданий, сооружений и городских территорий. С. 41-43 [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2013]. – Режим доступа: http://www.gu-unpk.ru/file/science/confs/2013/ee/publ/MIK-_2013.pdf - Загл. с экрана.

10. **Гончаренко, Г.А.** Система нечеткой логики для определения остаточного ресурса электропроводки в зданиях и сооружениях / Н.П. Воробьев, Г.А. Гончаренко, Е.Ю. Рыжикова // XI Международная научно-практическая интернет-конференция " Энерго- и ресурсосбережение - XXI век ", г. Орел, 15 марта по 30 июня 2013 г./ Секция № 8. Интеллектуальные технологии и автоматизированные системы управления в задачах повышения энергоэффективности. С. 262-264 [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2013]. – Режим доступа: http://www.gu-unpk.ru/file/science/confs/2013/ee/publ/MIK-_2013.pdf - Загл. с экрана.

11. **Гончаренко, Г.А.** Алгоритм оценки остаточного ресурса электропроводки зданий и сооружений на основе нечеткой логики / Г.А. Гончаренко // XI Международная научно-практическая интернет-конференция " Энерго- и ресурсосбережение - XXI век ", г. Орел, 15 марта по 30 июня 2013 г./ Секция № 1. Проблемы энергоресурсосбережения и безопасной эксплуатации зданий, сооружений и городских территорий. С. 183-185 [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2013]. – Режим доступа: http://www.gu-unpk.ru/file/science/confs/2013/ee/publ/MIK-_2013.pdf - Загл. с экрана.

12. **Гончаренко, Г.А.** Диагностика технического состояния электропроводки на основе интеллектуального анализа данных / Л.С. Попов, Г.А. Гончаренко, Н.П. Воробьев // 10-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь - 2013" (НиМ - 2013). Секция «Электроэнергетика». Подсекция «Электроснабжение. Электрическая и электромагнитная безопасность». – 3 с. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2013] – Режим доступа: http://edu.secna.ru/media/f/epb_tez_2013.pdf. - Загл. с экрана.

13. **Гончаренко, Г.А.** Техническая диагностика и остаточный ресурс электроустановок: монография / О. К. Никольский, Н.П. Воробьев, Г.А. Гончаренко, А.А. Сошников, Г.В. Суханкин, А.Ф. Костюков; под общ. ред. заслуженного деятеля науки и техники России, докт. техн. наук, проф. О. К. Никольского//Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. - 207 с.

Подписано в печать 6.11.2013. Формат 60x84 1/16.

Печать – цифровая. Усл.п.л. 1,16.

Тираж 100 экз. Заказ 2013 – 456

Отпечатано в типографии АлтГТУ,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46
тел.: (8-3852) 29-09-48

Лицензия на полиграфическую деятельность
ПЛД №28-35 от 15.07.97 г.