

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
им. И.И. ПОЛЗУНОВА

На правах рукописи

БАЛАШОВ Олег Петрович

**ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК
НА ОБЪЕКТАХ СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СЕЛА**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и
электрооборудование в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Барнаул - 2006

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова.

Научный руководитель: заслуженный деятель науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
НИКОЛЬСКИЙ Олег Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ХУДОНОГОВ Анатолий Михайлович;
кандидат технических наук, доцент
МЕНОВЩИКОВ Юрий Александрович

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный аграрный университет»

Защита состоится « 21 » декабря 2006г. в 12⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д212.004.02 при Алтайском государственном техническом университете им И.И. Ползунова по адресу: 656099, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, факс (3855) 36-71-29. www.astu.secna.ru, e-mail: olegbop@yandex.ru

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

Автореферат разослан « ____ » ноября 2006г.

И. о. учёного секретаря
диссертационного совета
д.т.н., профессор

КУЛИКОВА Л.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Структурные преобразования, произошедшие в стране в течение последних 10 лет и, в частности, в сельском хозяйстве, обусловленные ослаблением функций и контролем со стороны государства, привели к различным отрицательным последствиям. В первую очередь это связано с изменением финансирования объектов сельского хозяйства, которое выражается в передаче их с федерального бюджета на территориальный. Дефицит территориальных бюджетов и кризисное положение сельскохозяйственных производителей резко сократили инвестиционную деятельность, что сказалось на содержании объектов социальной инфраструктуры села (СИС), в первую очередь бюджетной сферы (образования, здравоохранения, культуры и др.), и явилось предпосылкой для создавшегося неудовлетворительного состояния в области безопасности электроустановок, выражающееся в неуклонном росте аварий, травматизме людей и пожаров.

Специфические условия эксплуатации электроустановок зданий в сельской местности, характеризующиеся низким уровнем обслуживания электроприборов (как правило, неэлектротехническим персоналом), существенным износом сетей и электропроводок, отсутствием современных электрозащитных средств, являются причиной возникновения аварийных режимов, увеличивают вероятность электротравм и пожаров. В настоящее время ежегодно от электротравматизма погибает более 4500 человек, при этом на долю сельской местности приходится порядка 67 % от общего числа. Одним из опасных и часто встречающихся случаев является электропоражение при косвенном прикосновении к открытым проводящим частям (ОПЧ) электроустановок, которые могут оказаться под напряжением в результате различных аварийных режимов.

Как показывает статистика, за последние 5 лет количество пожаров сохраняется примерно на том же уровне, а прямой материальный ущерб от них значительно вырос. Причем весомая доля пожаров (около 30%) вызвана электротехническими причинами. Так, число пожаров в сельской местности только за 2005 год по России составило около 80000, а прямой материальный ущерб - 2244,0 млн. рублей. По данным МЧС России максимальное количество пожаров приходится на здания и сооружения жилого, социально-бытового и культурного назначения. Отметим при этом, что в настоящее время не проводится работа по профилактике предупреждения техногенных аварий и опасных ситуаций. Отсутствует также необходимое методическое и проектное обеспечение, связанное с безопасностью электроустановок.

С этих позиций важным и своевременным является разработка мероприятий, направленных на предупреждения электротравм и пожаров на объектах социальной инфраструктуры села.

Целью работы является повышение безопасности электроустановок зданий в сельских населенных пунктах путем теоретического обоснования и практической реализации нового метода расчета и проектирования электрической защиты, позволяющего значительно снизить электропоражение людей и

получить при этом экономический эффект, обусловленный предотвращенным материальным ущербом от электротравматизма.

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

- провести анализ современного состояния безопасности сельских электроустановок и определить основные пути повышения эффективности мер по предупреждению электротравматизма;

- разработать математические модели электропоражения при возникновении основных травмоопасных ситуаций (прикосновения человека к токоведущим и проводящим частям электроустановок), позволяющие оценить предотвращенный материальный ущерб от электротравматизма;

- экспериментально исследовать распределение тока утечки в электропроводках зданий и выявить основные факторы, влияющие на его величину;

- разработать экспресс-метод выбора уставок устройств защитного отключения (УЗО-Д) применительно к электропроводкам зданий;

- разработать методику расчета и проектирования системы электробезопасности объектов СИС и провести оценку её технико-экономической эффективности.

Объект исследования. Объектом исследования являются электроустановки зданий сельских населенных пунктов.

Предмет исследования. Модели и методы повышения безопасности сельских электроустановок.

Методы исследования. При выполнении работы были использованы методы математического моделирования, системотехники, исследования операций, теория вероятностей и математическая статистика, теория планирования эксперимента. Экспериментальная часть выполнена с применением компьютерной техники и методов объектно-ориентированного программирования, специальных прикладных пакетов компьютерных программ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны математические модели электропоражения при возникновении основных травмоопасных ситуаций (прикосновения человека к токоведущим и токопроводящим частям электроустановки), позволяющие оценить предотвращенный материальный ущерб от электротравматизма людей по критериям технической и экономической эффективности электрической защиты;

- получены статистические распределения тока утечки в электропроводках зданий, с помощью которых представляется возможным оценивать и прогнозировать состояние электрической и пожарной безопасности объектов;

- на основе построения специальных номограмм разработан экспресс-метод, позволяющий выбирать такую величину уставки тока срабатывания УЗО-Д, которая бы обеспечивала необходимый уровень безопасности при соблюдении бесперебойного электроснабжения потребителей.

Практическая значимость работы

Внедрение в проектную практику разработанных математических моделей электропоражения с учетом возникновения опасных ситуаций повышает эффективность систем электрической защиты на объекте. Так, для сельских

образовательных учреждений предложенные методы дают возможность путем варьирования параметров электрической защиты и типов систем электроснабжения снизить вероятность электропоражения на 25% без дополнительных капитальных вложений.

Применение УЗО в различных системах электроснабжения позволит уменьшить вероятность электропоражения на объекте в 9,8...15 раз.

Внедрение экспресс-метода выбора уставок УЗО-Д при выполнении проектных и электромонтажных работ создает предпосылки для массового оснащения жилых, общественных и производственных зданий высокоэффективными средствами электрической защиты без применения дорогостоящей импортной аппаратуры и проведения специальных расчетов.

Реализация и внедрение результатов работы

Основные результаты работы внедрены в районах Алтайского края на объектах бюджетной сферы (школы, медицинские учреждения и т.д.), в Рубцовских районных электрических сетях, в ОАО «АСМ-Запчасть», в ЗАО «Контакт 108». Разработанные методические рекомендации по проектированию систем электробезопасности объектов социальной инфраструктуры села переданы в Главное управление сельского хозяйства Алтайского края для их практического использования.

Результаты работы используются в учебном процессе на электротехническом факультете Рубцовского индустриального института при чтении лекций, проведении практических и лабораторных занятий по курсу «Безопасность жизнедеятельности», а также в курсовом и дипломном проектировании.

Результаты диссертационной работы были представлены на всероссийском конкурсе инновационных проектов аспирантов и студентов по приоритетному направлению «Безопасность и противодействие терроризму» 2005 г. и отмечены дипломом.

Результаты работы были реализованы при создании руководящих и нормативных документов федерального и регионального уровня (Программа Министерства образования Российской Федерации «Безопасность образовательного учреждения на 2004-2006 годы» и «План мероприятий по обеспечению безопасности электроустановок в городах и районах Алтайского края 2004-2008 годы», утвержденный постановлением администрации Алтайского края от 24 ноября 2003г. №613).

Работа выполнялась в соответствии с государственной научно-технической программой 0.51.21 «Разработать и внедрить новые методы и технические средства электрификации сельского хозяйства» и Концепцией энергетического обеспечения сельскохозяйственного производства в условиях многоукладной экономики», принятой РАСХН в 1999 г.

Апробация работы. Основные материалы и результаты работы представлялись и обсуждались на всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Рубцовск, май 2004 г.); на восьмой международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-8-2002)» (Кемерово, 26, 27 сентября 2002 г.); на всероссийской научно-технической конференции (Руб-

цовск, 1-3 октября 2002г.), на всероссийской научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии в машиностроении» (Бийск, сентябрь 2003г.); на второй международной научно-практической конференции «Региональные аспекты обеспечения социальной безопасности населения юга Западной Сибири - проблемы снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (Барнаул, 10 декабря 2004г.); на одиннадцатой международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-11-2005)» (Барнаул, 26-28 сентября 2005 г.).

На защиту выносятся:

1. Комплексный подход к повышению эффективности системы электробезопасности, направленный на развитие методов моделирования, совершенствования диагностики состояния изоляции электропроводок и создание алгоритма объективного выбора уставки тока срабатывания УЗО-Д.

2. Математические модели электропоражения при возникновении основных травмоопасных ситуаций, позволяющие определить показатели технической и экономической эффективности СЭБ с учетом предотвращенного материального ущерба от электротравматизма.

3. Результаты экспериментальных исследований распределения тока утечки в электропроводках зданий.

4. Экспресс-метод выбора уставки тока срабатывания УЗО-Д при выполнении проектных и электромонтажных работ.

Публикации. По материалам диссертационных исследований опубликовано 14 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 179 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков, 22 таблицы. Список литературы включает в себя 122 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен анализ состояния безопасности электроустановок на объектах, расположенных в сельской местности, обоснованы цель и задачи исследования.

Проблему безопасности электроустановок следует рассматривать в двух аспектах: электрическом и пожарном.

Установлено, что состояние электробезопасности в России остается в настоящее время неблагоприятным по сравнению с другими высокоразвитыми странами. За последнее десятилетие прошлого века показатель электротравматизма возрос в 2,3 раза, тогда как в других странах он снизился: в США - в 1,25 раза, в Японии и Австрии - в 2,35 раза, в Германии - в 2 раза, в Испании - в 2,28 раза.

Установлено также, что около 69% электропоражений происходит при прямом прикосновении к токоведущим частям, а 28,3% - при прикосновении к ОПЧ электроустановок, оказавшихся под напряжением. Используемые в настоящее время средства электрической защиты из-за их низкой эффективности не обеспечивают электробезопасность человека. Широко распространенная система зануления в ряде случаев не способна осуществить надежную электрическую защиту, даже если ее параметры выбраны в соответствии с требованием ПУЭ. Причинами здесь могут быть значительный разброс времени срабатывания автоматических выключателей и предохранителей, обрыв нулевых защитных проводников и т.д. Согласно статистическим данным, электроtraumatизм среди сельского населения составляет 67% от общего их числа.

Обращает на себя внимание большой удельный вес пожаров на объектах в сельских населенных пунктах при их относительно малой энерговооруженности. Подавляющее количество пожаров здесь происходит в жилом секторе и на объектах бюджетной сферы (85%). Причем доля пожаров по электротехническим причинам (короткие замыкания, перегрузки и токи утечки) в 2005 году составила 32,2% от общего числа. В целом динамика пожаров в сельской местности за последние пять лет не претерпела существенных изменений и их количество составляет примерно 80 тысяч в год. Прогноз показывает, что количество пожаров от электроустановок в ближайшие годы может увеличиться.

Основными причинами сложившегося положения в области электроtraumatизма и пожарной безопасности в сельской местности являются: неудовлетворительное техническое состояние внутренних электрических сетей и аппаратов, обусловленное их износом, который достигает более 60%; недостаточная эффективность средств электрической защиты (предохранителей и автоматических выключателей); уменьшение объемов и несвоевременность капитальных и планово-предупредительных ремонтов электрических машин, аппаратов и электрических сетей; недостаточное выделение финансовых ресурсов на мероприятия по охране труда, электро- и пожаробезопасности установок; *недостаточная проработка научно-методических вопросов, касающихся расчета, проектирования и массового оснащения объектов инфраструктуры села современными устройствами защитного отключения.*

Большой вклад в развитие теории и практики электробезопасности внесли профессор Карякин Р.Н., Никольский О.К., Сидоров А.И., Сошников А.А., Якобс А.И. и др. Областью их деятельности явилось изучение вероятностных закономерностей причинно-следственных связей электротравматизма, диагностика состояния электроустановок, методы оценки и прогнозирования пожарной и электрической безопасности в электропроводках зданий. Вместе с тем, ряд важных вопросов, касающихся возникновения электротравматизма и оценки экономического ущерба от их последствий, остаются неизученными.

Результаты исследований показали, что наиболее опасными и распространенными являются ситуации, связанные с попаданием человека под напряжение путем непосредственного прикосновения к токоведущим или токопроводящим частям электроустановок. Такие ситуации являются основной причиной электропоражения с летальным исходом.

Рассматривая электропоражение как сложное случайное событие, отметим, что для его описания в настоящее время широко применяется методика вероятностного моделирования. При проектировании систем электробезопасности (СЭБ) и выполнении расчетов, связанных с выбором рациональных её вариантов, возникает необходимость рассмотрения совокупности критериев (показателей) эффективности функционирования такой системы, носящих как технический, так и экономический характер. При этом эффективность СЭБ должна обосновываться не за счет увеличения количества защитных аппаратов и значительных капиталовложений, а путем определения из множества вариантов наиболее рациональных удовлетворяющих критериям технической и экономической эффективности.

Серьезным препятствием, сдерживающим в настоящее время массовое внедрение высокоэффективной меры – УЗО-Д, является также отсутствие данных о распределении утечек тока через изоляцию на землю. Естественный фон тока утечки в электрических сетях зданий зависит от многих факторов: физических и геометрических параметров электропроводки, качества монтажа и обслуживания, вида нагрузки, длительности эксплуатации и т.д. Поэтому можно считать, что естественный фон тока утечки является некоторым функционалом от ряда случайных переменных. Отсутствие же данных о распределении утечки тока не позволяет априори диагностировать состояние изоляции электропроводки. Кроме того, при производстве электромонтажных работ, связанных с установкой УЗО-Д, в настоящее время при выборе уставки защиты требуется специальная дорогостоящая электроизмерительная аппаратура. Применение такой аппаратуры, не выпускаемой отечественной промышленностью, в условиях сельского хозяйства не представляется возможным. Поэтому в работе рассматривается задача создания специального метода, с помощью которого возможно в условиях эксплуатации или монтажа электрооборудования оперативно выбирать уставку тока срабатывания УЗО-Д без выполнения специальных расчетов, измерений и привлечения высококвалифицированных специалистов.

На основании вышеизложенного сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей электропоражения, позволяющих определить техническую и экономическую эффективность СЭБ с учетом предотвращенного материального ущерба от электротравматизма.

Рассмотрены основные опасные ситуации, которые возникают в процессе трудовой деятельности человека на объектах СИС. К ним относятся: прямые прикосновения к токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением; косвенные прикосновения к ОПЧ электроустановки, находящейся под напряжением в результате короткого замыкания фазы на корпус и обрыва PEN-проводника.

Общая задача моделирования формулируется следующим образом: по заданной совокупности средств электрозащиты требуется определить техническую эффективность проектируемой системы электробезопасности и основные

Заметим, что сомножители $P(\text{ЭП})_{ij}$ имеют весьма малые значения (порядка $10^{-4} \dots 10^{-6}$). Тогда, принимая $1 - P(\text{ЭП})_{ij} \approx 1$, получим матричную форму вероятностей электропоражения множества N людей на объекте:

$$\begin{bmatrix} P(\text{ЭП})_1 \\ P(\text{ЭП})_2 \\ \dots \\ P(\text{ЭП})_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} \dots & P_{ij} \dots & P_{iM} \\ P_{i1} \dots & P_{ij} \dots & P_{iM} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{N1} \dots & P_{Nj} \dots & P_{NM} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_{\text{пор}1} \\ P_{\text{пор}j} \\ \dots \\ P_{\text{пор}M} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\text{или } P(\text{ЭП}) = P^* \times P_{\text{пор}}, \quad (5)$$

где $P(\text{ЭП})$ - вектор-столбец вероятностей электропоражения людей на объекте, P^* - матрица опасных ситуаций, членами которой являются вероятности попадания людей под напряжение; $P_{\text{пор}}$ - вектор-столбец условных вероятностей электропоражения.

Заметим, что в качестве опасных ситуаций рассматриваются случаи попадания под напряжение либо путем прикосновения к токоведущим частям электроустановки, либо - к токопроводящим частям оборудования, оказавшимся под напряжением в результате аварии.

Оценку технической эффективности СЭБ и прогнозирования уровня электропоражения для отраслей сельского хозяйства или регионов целесообразно проводить с помощью интегрального показателя:

$$M(\text{ЭП})_{\Sigma} = \sum_{k=1}^Q M(\text{ЭП})_k, \quad (6)$$

где $M(\text{ЭП})$ - математическое ожидание числа электропоражений на множестве N за время T ; Q — количество объектов, населенных пунктов в регионе и т.д.

Экономическая эффективность СЭБ Э_2 представляет собой количественную оценку, которая может быть выражена одним из показателей:

а) среднегодовым экономическим эффектом, обусловленным предотвращенным материальным ущербом от электропоражений:

$$\text{Э}_2' = \text{Э}_{\text{пр}} - \text{З}, \quad (7)$$

где $\text{Э}_{\text{пр}}$ - предотвращенный материальный ущерб от электротравматизма после внедрения СЭБ; З - приведенные затраты.

Если $\text{Э}_{\text{пр}} > \text{З}$, то СЭБ имеет экономическую эффективность, в противном случае – СЭБ экономически затратная.

б) приведенными затратами:

$$\text{Э}_2'' = \text{З} = K \cdot E + C, \quad (8)$$

где E – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; K – капитальные вложения в СЭБ; C – ежегодные затраты на эксплуатацию системы;

в) полными затратами с учетом остаточного (не предотвращенного) ущерба после внедрения или модернизации СЭБ:

$$\text{Э}_2''' = \text{З}_{\text{п}} = \text{З} + Y_{\text{ос}}, \quad (9)$$

где $Y_{\text{ос}}$ - остаточный ущерб, который имеет место после внедрения СЭБ.

В свою очередь:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}} = \frac{\sum_{i=1}^T M(\text{ЭП})_{\text{пр}i} Y_{\text{р}i}}{T} \quad \text{и} \quad Y_{\text{ос}} = \frac{\sum_{i=1}^T M(\text{ЭП})_{\text{ос}i} Y_{\text{р}i}}{T}, \quad (10)$$

где $Y_{\text{р}i}$ - среднестатистический ущерб, вызванный гибелью одного человека в i -м году рассматриваемого периода T .

Вопрос о материальной оценке ущерба от гибели человека до сих пор является дискуссионным, поскольку он затрагивает так называемую стоимость человеческой жизни. Однако здесь необходимо различать два понятия: жизнь конкретного человека и жизнь среднестатистического человека. Безусловно, что жизнь индивида бесценна и ее нельзя сводить к некоему денежному эквиваленту. В то же время при допустимом (приемлемом риске для жизни) ценность статистической жизни можно считать конечной, которую можно представить в денежном выражении. Следует также понимать, что далеко не все затраты, направленные на снижение риска для здоровья и жизни, экономически возможны. Поэтому добиваться снижения такого риска любыми средствами нереально. Выходом здесь может быть установление некоторого предела финансовых средств, выше которого их расходование становится нецелесообразным при определенном уровне экономического развития общества. Нахождение величины финансовых затрат может быть определено путем рационального варианта СЭБ.

В диссертации рассмотрен приближенный метод оценки стоимости статистической жизни человека ($C_{\text{СЖЧ}}$), в основе которого лежит расчет экономического ущерба от преждевременной его гибели (в данном случае, вызванной электротравмой). Преждевременная смерть здесь связана с материальными потерями общественной полезности человека. Тогда среднегодовой доход на человека можно представить как количественную характеристику общественной полезности статистического человека.

На основании этого, стоимость статистической жизни человека или экономический ущерб от его гибели может быть определен:

$$Y_{\text{р}i} = C_{\text{СЖЧ}} = \text{ВВП}_{\text{ср.душ}} \int_0^T \exp(-E \cdot t) dt, \quad (11)$$

где $\text{ВВП}_{\text{ср.душ}}$ - валовый внутренний продукт на душу населения; E - норма дисконтирования, T - ожидаемая продолжительность жизни.

Принимая допущения о неизменности на протяжении T лет величин $\text{ВВП}_{\text{ср.душ}} = 152098$ руб. (по данным 2005 г.) и $E = 0,08 \text{ год}^{-1}$ и считая, что продолжительность предстоящей жизни статистического человека равна 30 годам, получаем величину ущерба $Y_{\text{р}i}$, в размере 1676603 рубля или около 58500 \$ США.

Ценность статистической жизни может значительно увеличиться по мере стабилизации экономического положения в России.

Основой определения показателей эффективности СЭБ явилась обобщенная математическая модель (рисунок 1) и разработанный в диссертации программно-вычислительный комплекс.

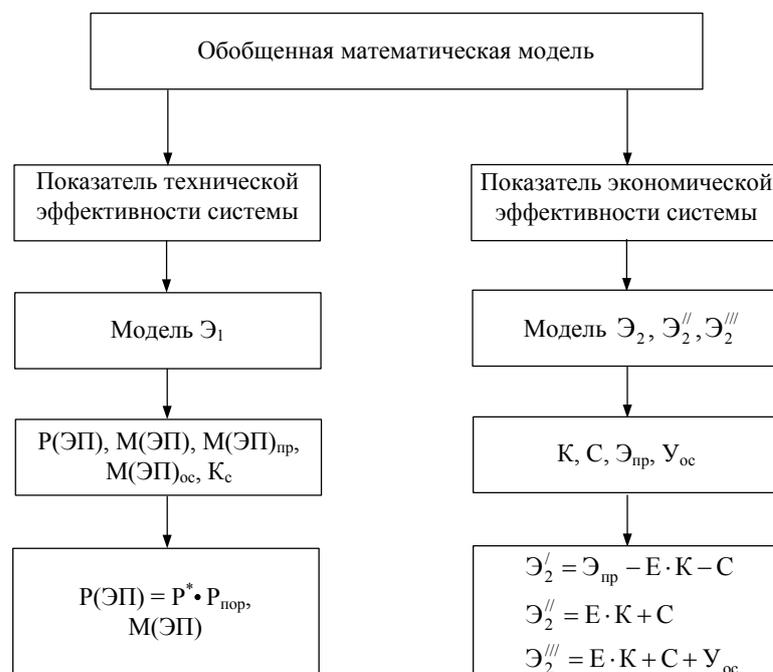


Рисунок 1. Структура обобщенной математической модели

Разработанный метод моделирования и алгоритмы расчета позволили решить ряд практических задач, связанных с проектированием и выбором рациональной СЭБ для объектов инфраструктуры сельских населенных пунктов.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям распределения тока утечки в электроустановках зданий и разработке на этой основе экспресс-метода выбора уставок УЗО-Д на объектах.

Разработанная в диссертации методика проведения экспериментальных исследований позволяет определить:

- максимальную величину тока утечки в электропроводках зданий;
- характер распределения тока утечки;
- закономерности изменения уровней фона токов утечки в электроустановках.

Были проведены экспериментальные исследования естественных токов утечки на 153 объектах в сельских населенных пунктах Алтайского края. При этом было выделено пять групп объектов инфраструктуры села: медицинские и образовательные учреждения, предприятия бытового обслуживания и торговли, учреждения культуры.

Целью исследований являлось определение основных факторов, влияющих на величину тока утечки в электрических сетях зданий. В процессе измерения тока утечки фиксировались марка электропроводки и давность ее монтажа, режим работы электроустановки (отключенная и включенная электрическая нагрузка), протяженность питающих линий (осветительные и силовые сети), мощность и вид нагрузки (осветительная, электротермическая и электродвигательная). Измерению тока утечки подвергались наиболее распространенные электропроводки (АПВ, АППВС и АПР) скрытого и наружного исполнения.

Измерения проводились с помощью специального прибора, в основе которого лежит принцип работы устройства защитного отключения. Измерительный прибор включался в рассечку фазных и нулевого проводов, что дало возможность определить нескомпенсированный ток утечки при отключенной нагрузке, в осветительных и силовых линиях под нагрузкой, суммарный ток утечки на вводах при максимальной нагрузке каждой групповой линии.

Обработка результатов осуществлялась на персональном компьютере Pentium III с помощью ряда прикладных программ (SPSS 10, SPSS Sigma, Plot, Statistica 6.0, Matlab), в которых реализованы необходимые методы обработки данных.

Репрезентативность выборки экспериментальных данных подтверждена критерием Стьюдента при доверительной вероятности $P=0,95$ и относительной погрешности 5 %, нормальность распределения величины тока утечки в электропроводах - критериями Пирсона (χ^2) и Колмогорова - Смирнова.

В результате обработки статистических данных установлено:

1. Ток утечки зависит от вида электрической нагрузки и не превышает следующих значений: для сети освещения – не более 3 мА; для электротермической нагрузки – 15...17 мА; для электродвигателей - не более 24 мА. При этом не установлено существенной разницы величин тока утечки от вида обследованных объектов.

2. При включении нагрузки происходит заметное увеличение тока утечки, однако верхний предел его в трехфазных сетях не превышает 30 мА. Значительное увеличение тока утечки наблюдается при включении электротермических устройств (один киловатт активной нагрузки соответствует приращению тока утечки примерно на 0,5 мА). При включении электродвигателей в результате переходного процесса наблюдаются кратковременные скачки тока утечки.

3. Не замечено ухудшение изоляционных свойств электропроводки зданий от времени эксплуатации, что можно объяснить отсутствием воздействия внешних условий и других временных факторов на параметры изоляции. Наилучшими изоляционными свойствами обладают скрытые электропроводки, выполненные маркой провода ППВ и АППВ с поливинилхлоридной изоляцией.

4. Кривые распределения тока утечки близки к нормальному закону, имеют полимодальный характер, положительную асимметрию, что свидетельствует о наличии факторов, наиболее влияющих на параметры изоляции.

Задача корреляционного анализа состояла в определении тесноты и формы связи между факторными и результативными признаками. Измерение тесноты связи сводилось к определению коэффициентов корреляции, а изучение формы связи, т.е. характера изменения одного признака зависимости от изменения другого - к построению линий регрессии.

Задача многофакторного анализа параметров изоляции представляется как функция отклика:

$$y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (12)$$

где y_i - зависимая переменная (величина естественного тока утечки),

x_1, x_2, \dots, x_n - значения факторов (аргументов), определяющих величину тока утечки I_{yTi} .

При составлении парных корреляционных зависимостей в качестве рассматриваемых факторных признаков были приняты мощность включенных электроприемников (P) и вид нагрузки, количество включенных электроприемников (n), протяженность внутренних силовых сетей и осветительных электропроводок (ℓ), давность монтажа (t), марка провода.

В диссертации показано, что существует тесная положительная корреляция (более 0,7) между величиной тока утечки и общим количеством включенных в сеть электроприемников, их мощностью и видом нагрузки. Корреляционная связь между током утечки и протяженностью электрических линий незначительная (не более 0,3).

В работе получены уравнения регрессии (с учетом принятого допущения о линейной модели и представления схемы замещения электропроводки как цепи с распределенными параметрами):

$$I_{yT}^{осв} = -9,87 + 0,23P + 0,11n + 0,007\ell \text{ [мА]}, \quad (13)$$

$$I_{yT}^{терм} = -17,21 + 0,513P + 0,91n + 0,037\ell \text{ [мА]}, \quad (14)$$

$$I_{yT}^{двиг} = -23,91 + 0,874P + 0,79n + 0,097\ell \text{ [мА]}, \quad (15)$$

где P - активная мощность электроприемников [кВт]; n - количество электроприемников; ℓ - длина линий [м].

Уравнения множественной регрессии, освобождающей от искажающего влияния сопутствующего фактора (наличия положительной связи между n и P , корреляционно связанного с исследуемым фактором), позволяют достаточно точно проводить мониторинг состояния электрических сетей и электрооборудования, а следовательно, прогнозировать ожидаемый ток утечки в рабочем режиме по заданным их характеристикам.

На основании проведенных исследований в диссертации разработан экспресс-метод, с помощью которого можно выбирать уставки тока срабатывания УЗО-Д, не производя специальных расчетов и измерений. В основе этого метода лежат номограммы, устанавливающие статистические связи между током утечки и мощностью электрической нагрузки, количеством включенных в сеть электроприемников и протяженностью внутренних электрических сетей. Номограммы построенные на плоскости, позволяют по заданным параметрам P , n и ℓ однозначно определить значение уставки УЗО-Д.

В диссертации разработан алгоритм применения экспресс-метода для выбора уставки УЗО-Д, при этом относительная погрешность получаемого значения величины тока утечки не превышает 6% по сравнению с соответствующими уравнениями регрессии.

В четвертой главе осуществлена практическая реализация метода расчета и проектирования системы электробезопасности и проведена оценка её технико-экономической эффективности.

Для решения поставленной задачи обоснована необходимость применения автоматизированных средств проектирования и сформулированы требова-

ния к программному комплексу (учитывающие специфику вычислительных операций и потребности пользователя), определены его компоненты: класс персонального компьютера, операционная система, система программирования, прикладное программное обеспечение. В качестве системы программирования целесообразно использовать объектно-ориентированную программную среду «Delphi». Структура программного комплекса представлена на рисунке 2.

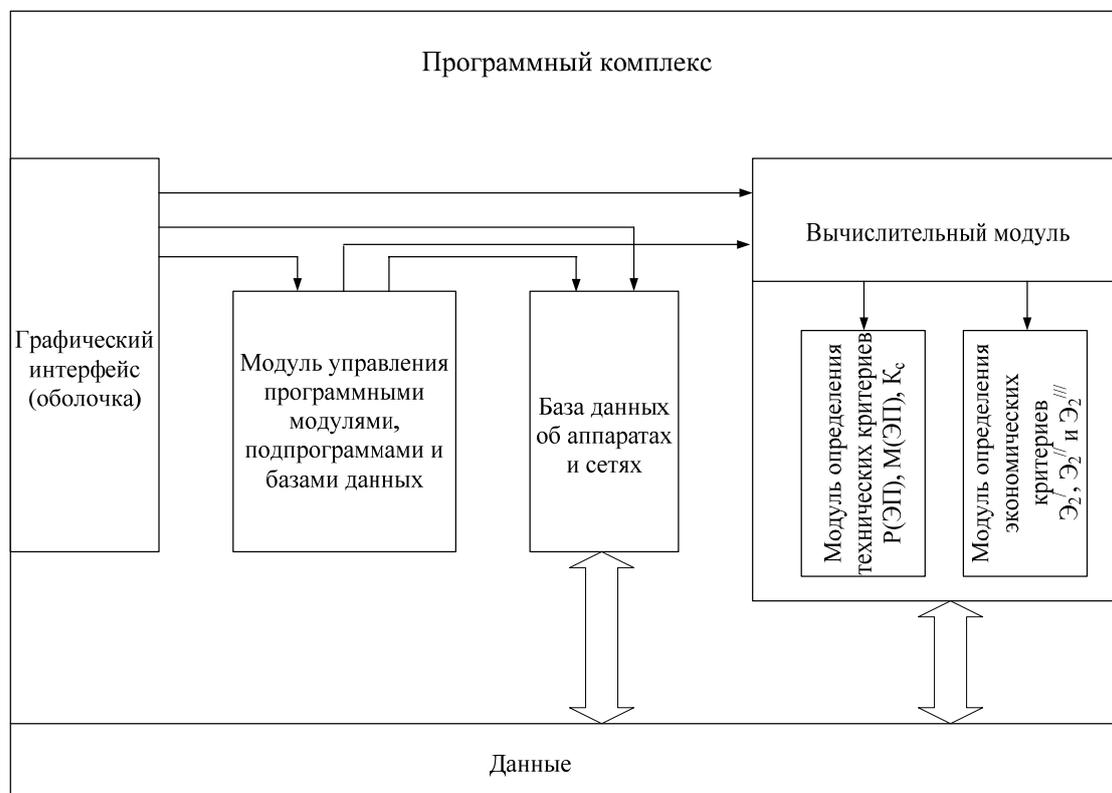


Рисунок 2. Структура программного комплекса

В основу программного комплекса положен модульный принцип. Он дает возможность при необходимости использовать дополнительные расчетные модули и подпрограммы для определения различных показателей эффективности СЭБ в его рамках.

Разработанные математические модели электропоражения, позволяющие оценить предотвращенный материальный ущерб, реализованы на основании алгоритмов в программном комплексе «САРК» для персонального компьютера. Комплекс дает возможность выполнить расчет технико-экономических показателей для оценки эффективности системы электробезопасности. Такие расчеты были произведены на ряде действующих объектах СИС. В качестве примера был выбран типичный объект - учебно-производственный комплекс средней школы с. Новогорьевское Егорьевского района Алтайского края, для которого рассматривались четыре варианта СЭБ.

Первый вариант - реально существующая на объекте система зануления, часть аппаратов защиты которой (предохранители, автоматические выключатели) выбраны с нарушениями требований ПУЭ, например, использование не-

калиброванных плавких вставок или несоответствие параметров защиты токам короткого замыкания в электроустановках.

Второй вариант – параметры системы зануления соответствуют требованиям ПУЭ.

Третий и четвертый варианты СЭБ – предполагают использование устройств защитного отключения в сочетании с традиционной системой зануления. Третий вариант соответствует установке УЗО в главном шкафу, в четвертом – аппаратура устанавливается на отходящих линиях к электроприемникам (селективная защита).

Определение технических показателей эффективности СЭБ осуществлялось по формулам (2), (4), (5) и (6). В таблице 1 приведены значения технических показателей для каждого из вариантов, которые сравнивались с нормативным уровнем электробезопасности 1×10^{-6} принятым МЭК.

Таблица 1

Уровень электробезопасности при различных вариантах СЭБ

Номер варианта	Электротравма при опасной ситуации		
	прямое прикосновение к токоведущим участкам	косвенное прикосновение при о.к.з	косвенное прикосновение при обрыве PEN-проводника
Вариант первый	$9,84 \cdot 10^{-2}$	$2,79 \cdot 10^{-3}$	$8,99 \cdot 10^{-3}$
Вариант второй	$7,93 \cdot 10^{-3}$	$2,22 \cdot 10^{-3}$	$8,99 \cdot 10^{-3}$
Вариант третий	$5,44 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$9,17 \cdot 10^{-4}$
Вариант четвертый	$3,97 \cdot 10^{-6}$	$3,35 \cdot 10^{-6}$	$6,74 \cdot 10^{-6}$

Из анализа данных, приведенных в таблице 1, следует:

1. Традиционная система защиты (первый и второй варианты) не обеспечивают электробезопасность в случае прямого прикосновения к токоведущим частям электроустановки (попадание под фазное напряжение).

2. Наиболее опасным аварийным режимом является обрыв PEN-проводника, исключающий функционирование системы зануления.

3. Применение УЗО обеспечивает высокий уровень электробезопасности ($3 \dots 5 \times 10^{-6}$) при возникающей наиболее опасной ситуации – прямого прикосновения к оголенному проводу.

4. Обрыв PEN-проводника в системе электроснабжения практически не снижает электротехническую эффективность УЗО.

На основании разработанного в диссертации метода расчета выполнен проект системы электробезопасности объекта при оснащении его устройствами защитного отключения (таблица 2).

Таблица 2

Результаты расчета технико-экономических показателей СЭБ при установке
УЗО на объекте

Вид защиты	Кол-во установленных УЗО	Показатель технической эффективности \mathcal{E}_1 [Р(ЭП)]	Показатель экономической эффективности \mathcal{E}_2		
			Приведенные затраты \mathcal{E}_2'' (руб.)	Полные затраты \mathcal{E}_2''' (руб.)	Экономический эффект с учетом предотвращенного электротравматизма \mathcal{E}_2' (руб.)
Головная (установка УЗО на вводе)	1	$7,84 \times 10^{-4}$	2250	2293,7	53593
Групповая (установка УЗО на отходящих линиях)	4	$5,29 \times 10^{-6}$	2700	2700,3	53187
Индивидуальная (установка УЗО на отдельных электроприемниках)	17	$4,76 \times 10^{-6}$	6600	6600,27	49287

Результаты расчета позволяют сделать следующие выводы:

1. Принимая во внимание, что установка УЗО обеспечивает достаточно высокий уровень электробезопасности ($7,84 \times 10^{-4}$; $5,29 \times 10^{-6}$; $4,76 \times 10^{-6}$), наиболее предпочтительным в экономическом отношении (минимальные приведенные затраты) представляет головное исполнение защиты путем установки защитного аппарата на вводе.

2. Групповая защита, осуществляемая посредством установки УЗО, обладает селективностью в сравнении с головной защитой. Поэтому следует рекомендовать применение этого вида защиты, улучшающего условия эксплуатации электрооборудования и сводящего к минимуму перерывы электроснабжения объекта.

3. Использование индивидуальной системы защиты оправдано на электроприемниках, относящихся к первой категории электроснабжения.

4. Экономический эффект с учетом предотвращенного материального ущерба от электропоражений, более чем на порядок превышает затраты, связанные с установкой УЗО на объекте.

Разработанные методы расчета СЭБ были положены в основу «Методических рекомендаций по проектированию систем электробезопасности объектов социальной инфраструктуры села», переданных в Главное управление сельского хозяйства Алтайского края для практического применения.

Основные выводы и результаты исследований

1. Основными причинами неудовлетворительного состояния безопасности электроустановок объектов в сельских населенных пунктах являются низкая эффективность применяемых традиционных электрозащитных средств, значительный износ сетей и электропроводок, сдерживание использования современных технологий предупреждения аварий, электротравматизма и пожаров из-за недостаточности проработки ряда научно-методических задач в области моделирования и проектирования систем электробезопасности.

2. Разработаны математические модели электропоражения при возникновении основных травмоопасных ситуаций, вызванных прикосновением человека к токоведущим и токопроводящим частям электроустановки, и аварийных режимов.

3. Разработана методика расчета показателей технической и экономической эффективности СЭБ с учетом варьирования номенклатуры электрозащитных средств и их параметров. Впервые для оценки экономической эффективности было предложено использовать показатель предотвращенного материального ущерба от электротравматизма.

4. Определены статистические распределения токов утечки в электропроводках зданий и выявлены основные факторы, влияющие на его величину. Установлено, что ток утечки существенно зависит от вида электрической нагрузки и не превышает следующих значений: для сетей освещения - 3 мА; для электротермической нагрузки – 15...17 мА; для электродвигателей – 24 мА. Значительное увеличение тока утечки наблюдается при включении электротермических устройств (один киловатт активной нагрузки соответствует приращению естественного фона тока утечки на 0,5 мА).

5. Разработанный экспресс-метод позволяет обоснованно выбирать уставку тока срабатывания УЗО-Д с учетом естественного фона тока утечки, гарантируя тем самым необходимый уровень электробезопасности и бесперебойность электроснабжения потребителя. Применение этого метода создает предпосылки массового оснащения жилых, общественных и производственных зданий в сельской местности устройствами защитного отключения, не требует использования специальной измерительной аппаратуры и выполнения расчетов, привлечения высококвалифицированного персонала.

6. Разработанная методика расчета и проектирования СЭБ позволила провести оценку её технико-экономической эффективности. Установлено, что массовое оснащение объектов инфраструктуры села устройствами защитного отключения позволяет обеспечить уровень электробезопасности ($3...7 \times 10^{-6}$), сопоставимый с нормативом МЭК (1×10^{-6}). При этом экономический эффект от внедрения УЗО, обусловленный предотвращенным материальным ущербом от электротравматизма, в среднем на порядок превышает финансовые затраты на создание современных систем электробезопасности.

7. Результаты работы были реализованы при создании руководящих и нормативных документов федерального и регионального уровня (Программа Министерства образования Российской Федерации «Безопасность образова-

тельного учреждения на 2004-2006 годы» и «План мероприятий по обеспечению безопасности электроустановок в городах и районах Алтайского края 2004-2008 годы», утвержденный постановлением администрации Алтайского края от 24 ноября 2003г. №613).

Список основных публикаций по теме диссертационной работы

1. Балашов, О.П. Перспективы развития устройств защитного отключения/ О.П. Балашов // Вестник Алтайского государственного технического университета. 2001. №1. С. 77-81.

2. Балашов, О.П. Выбор оптимальных систем электробезопасности электрооборудования технологических процессов в сельском хозяйстве/ О.П. Балашов // Известия ТулГУ. Вып. 2. - Тула. Изд-во ТулГУ, 2004. – С.3-9.

3. Балашов, О.П. Модель оценки качества элементов электрической защиты/ О.П. Балашов // Вестник Алтайского государственного технического университета. 2003. №1. С. 230-232.

4. Балашов, О.П. Определение критерия надежности системы электробезопасности на объектах сельского хозяйства и инфраструктуры села/ О.П. Балашов // Ползуновский альманах. 2004. №1. С. 179-181.

5. Никольский, О.К. Повышение пожаробезопасности в установках низкого напряжения при возникновении перенапряжения большой кратности/ О.К. Никольский, О.П. Балашов // Региональные аспекты обеспечения социальной безопасности населения юга Западной Сибири – проблемы снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Материалы 2-й международной научно-практической конференции 10 декабря 2004г. Барнаул: Изд-во АлтГТУ. С.16-17.

6. Никольский, О.К. Некоторые особенности использования устройств защитного отключения в сетях с глухозаземленной нейтралью/ О.К. Никольский, О.П. Балашов // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС – 11 – 2005): Доклады 11-й международной научно-практической конференции, Барнаул, 26-28 сент. 2005 /Отв. ред. В.Н. Масленников. - Томск: ТГУ, 2005. С. 119-122.

7. Никольский, О.К. Особенности применения электронных устройств защитного отключения в сетях с глухозаземленной нейтралью/ О.К. Никольский, О.П. Балашов // Вестник Алтайского научного центра САН ВШ. – Изд-во АлтГТУ, 2005. №8. С. 133-139.

8. Балашов, О.П. Оптимизационные методы исследования систем электропожаробезопасности/ О.П. Балашов, О.К. Никольский // Вестник Алтайского государственного технического университета. 2003. №1. С. 47-50.

9. Балашов, О.П. Исследования распределения тока утечки в электроустановках низкого напряжения общественных зданий/ О.П. Балашов // Известия ТулГУ. Вып. 2. - Тула. Изд-во ТулГУ, 2006. – С.147-154.

10. Балашов, О.П. Автоматизация моделирования систем электропожаробезопасности в среде Windows/ О.П. Балашов // Всероссийская научно-

техническая конференция: Тезисы научных сообщений. 1-3 октября 2002г. / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2002. С. 55-56.

11. Балашов, О.П. Повышение эффективности действия устройств защитного отключения/ О.П. Балашов, В.Г. Плеханов // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС – 8 – 2002): Доклады 8-й международной научно-практической конференции. Кемерово, 26-27 сент. 2002г.: В 2 ч., ч.1. - Томск: ТГУ, 2002. С. 64-66.

12. Балашов, О.П. Устройства защитного отключения: развитие функциональных возможностей/ О.П. Балашов // Вестник Алтайского государственного технического университета. 2003. №1. С. 51-53.

13. Балашов, О.П. Использование средств автоматизированного проектирования при разработке систем электрической защиты/ О.П. Балашов // Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Материалы 3-й всероссийской научно-практической конференции 25-26 сентября 2003 г. Бийск: АлтГТУ, 2003. С. 152-155.

14. Балашов, О.П. Сравнительный анализ программных продуктов САПР электропожаробезопасности/ О.П. Балашов, Г.В. Плеханов // Новые материалы и технологии в машиностроении: Всероссийская научно-техническая конференция 24-25 мая 2004 года / Рубцовский индустриальный институт. - Рубцовск, 2004. С. 83-84.

Подписано в печать 14.11.06.

У. п. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ 06-523. Рег. №69.

Отпечатано в ООО «Фирма Выбор»
658201, г. Рубцовск, пр. Ленина, 41