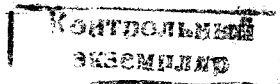


05.26.01
10831



На правах рукописи

Юрченко Екатерина Юрьевна

**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ГОРОДСКИХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ
НАПРЯЖЕНИЕМ 6 – 10 кВ С РАЗРАБОТКОЙ РЕКОМЕНДАЦИЙ
ПО УЛУЧШЕНИЮ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск

2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» на кафедре «Безопасность жизнедеятельности».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Коржов А.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кузнецов К.Б.,
доктор технических наук
Кравчук И.Л.

Ведущее предприятие – государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральский государственный технический университет (УГТУ-УПИ).

Защита состоится 25 июня 2009 г., в 12 часов, в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2009 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Учёный совет ЮУрГУ, тел./факс: (351) 267-94-49, e-mail: Katerina_bgd07@mail.ru

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Ю.С.Усынин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



Актуальность работы. Состояние изоляции кабельных линий (КЛ) определяет условия безопасной эксплуатации, надёжного электроснабжения и экономичной работы кабельных сетей. В последнее время в связи с внедрением новых технологий и увеличением потребления электроэнергии растёт длина городских кабельных сетей. Так, если на начало 2000 года на балансе филиала ОАО «МРСК Урала» «Челябэнерго ПО ЧГЭС», включающего в себя 5 предприятий районных электрических сетей (РЭС), находилось 1681 КЛ с пропитанной бумажной изоляцией напряжением 6–10 кВ общей протяжённостью 815 км, то на конец 2008 года эксплуатировалось 2054 КЛ протяжённостью 994 км. С каждым годом растёт число КЛ, выработавших нормативный срок службы в 30 лет, установленный заводом-изготовителем. Из-за старения изоляции и большой протяжённости городских кабельных сетей у обслуживающего персонала увеличивается объём работы, связанный с осмотром кабельных трасс, выездом на место повреждений, проведением высоковольтных испытаний и ремонтов. Это не может не сказываться на условиях труда персонала и безопасности проживающего вблизи трасс населения.

На первый взгляд, решение этого вопроса заключается в замене старых кабелей новыми и современными, например, из сшитого полиэтилена. Замена таких кабелей займёт много времени, потребует больших физических и финансовых затрат, а воздействие на изоляцию факторов, которые сокращают срок службы кабеля, останется. В этом случае возникает проблема определения механизма воздействия на изоляцию факторов, характерных для конкретных участков городской сети, для которых прогноз повреждаемости изоляции КЛ будет достоверным.

Решение поставленной задачи может быть получено путём анализа необходимой статистической информации об эксплуатации КЛ с использованием вероятностно-статистического метода оценки состояния изоляции. Точность расчётов зависит от полноты исходных данных. Пробой изоляции городских КЛ является редким событием. По справочным данным средняя частота устойчивых отказов КЛ напряжением 6–10 кВ (ω) составляет 7,5 шт./100 км·год. Для г. Челябинска в зависимости от РЭС ω варьируется от 2 до 17 шт./100 км·год. В связи с тем, что хранящаяся на предприятиях информация никак не используется в целях повышения надёжности функционирования кабельных сетей, часть её может быть утеряна, часть – не отражена должным образом в отчётной документации. Поэтому разработка алгоритма сбора и хранения информации о состоянии КЛ и воздействующих на неё факторах в виде, удобном для проведения качественного инженерного и статистического анализа, также является актуальной задачей.

Работа выполнена в соответствии с перечнем приоритетных направлений развития науки, технологий и техники на период до 2010 года и поддержана в 2008 году грантом по программе развития научно-исследовательских работ

студентов, аспирантов и молодых учёных в высших учебных заведениях Челябинской области, осуществляемой Министерством образования и науки РФ и Правительством Челябинской области.

Цель работы – предупреждение аварийного состояния изоляции городских КЛ для обеспечения безопасности обслуживающего персонала и населения.

Идея работы – прогнозирование повреждаемости изоляции городских КЛ на основе ретроспективного изучения статистики отказов кабелей.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. В городских сетях ряд пробоев изоляции кабелей подчиняется геометрическому распределению независимо от территории прокладки КЛ.

2. Деление кабельных сетей в зависимости от территории прокладки на группы, для которых характерно определённое сочетание факторов, позволяет прогнозировать повреждаемость отдельных участков КЛ.

3. Алгоритм сбора и хранения данных, позволяющий проводить оценку состояния изоляции кабельных сетей в условиях более полной статистической информации.

4. Методика составления прогноза и математическая модель повреждаемости городских КЛ, учитывающие совокупное воздействие различных факторов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением аппарата математической статистики и теории вероятностей, большой выборкой данных (3002 пробоя 2054 КЛ протяжённостью 994 км за 76 лет эксплуатации, 6523 акта на монтаж муфт, климатические параметры за 14 лет), удовлетворительным совпадением результатов, полученных при проведении расчётов, с данными, полученными при эксплуатации КЛ в реальных условиях.

Значение работы. Научное значение работы заключается в том, что:

– обосновано применение геометрического распределения при прогнозировании дискретной величины пробоев изоляции городских КЛ;

– проведена оценка внешних факторов, воздействующих на состояние изоляции, и установлено влияние территории прокладки КЛ на срок службы изоляции кабелей;

– разработаны методика составления прогноза и математическая модель повреждаемости изоляции городских КЛ, оценивающие состояние изоляции отдельных участков КЛ.

Практическое значение работы заключается в следующем:

– предложены рекомендации по продлению срока службы городских КЛ, которые улучшают условия электробезопасности и могут быть использованы при проектировании кабельных сетей, выборе схем трассировки линий;

– разработана электронная база данных, позволяющая проводить оценку состояния изоляции кабельных сетей в условиях более полной статистической информации;

- получен прогноз повреждаемости городских КЛ по месяцам на ближайший год для отдельных территорий прокладки;
- применение разработанной методики прогнозирования повреждаемости КЛ позволяет составить вероятностно-территориальную карту кабельных сетей, на которой указывать наиболее опасные участки с максимальной повреждаемостью КЛ.

Реализация выводов и рекомендаций работы.

Научные положения, выводы и рекомендации внедрены в работу городских электрических сетей филиала ОАО «МРСК Урала» «Челябэнерго ПО ЧГЭС». Используются Южно-Уральским государственным университетом в лекционном курсе «Передача и распределение электрической энергии» при обучении студентов специальностей 140204 («Электрические станции»), 140205 («Электроэнергетические системы и сети»), 140203 («Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»), а также в лекционном курсе «Основы электробезопасности» при обучении студентов специальности 280101 («Безопасность жизнедеятельности в техносфере»).

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационной работы были доложены, рассмотрены и одобрены: на XIII и XIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (Томск, 2007, 2008); на Международной научно-практической конференции в области экологии и безопасности жизнедеятельности «Дальневосточная весна 2008» (Комсомольск-на-Амуре, 2008); на Международной научной конференции «Охрана труда и социальная защита работников» (Киев, 2008); на XVI Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (Москва, 2008); на II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 2007); на I и II Всероссийской научно-технической конференции «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий» (Уфа, 2007, 2009); на Всероссийской научно-технической конференции «Наука – производство – технология – экология» (Киров, 2008); на Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность и экология технологических процессов и производств» (Ростовская область, п. Персиановский, 2008); на IV Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика в современном мире» (Чита, 2009); на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (2006 – 2009 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, 3 из них в журналах, рекомендованных ВАК, получено свидетельство об отраслевой регистрации разработанной математической модели.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 130 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка, 19 таблиц, список используемой литературы из 125 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, идея и научные положения, выносимые на защиту, отмечена научная значимость и практическая ценность работы.

Большой вклад в исследование характера отказов, разработку и внедрение методов контроля изоляции электрооборудования внесён такими учёными, как Белых Б.П., Бендик Н.А., Борисоглебский П.В., Брагин С.М., Брагинский В.И., Гладилин Л.В., Канискин В.А., Лебедев Г.М., Мусин А.Х., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Пешков И.Б., Сидоров А.И., Соболев В.Г., Таджикибаев А.И., Цапенко Е.Ф., Шалыт Г.М., Шувалов М.Ю., Щуцкий В.И. и др. Однако процесс старения изоляции под воздействием комбинации факторов в полном объёме до сих пор не изучен.

В реальных условиях эксплуатации на протяжённую КЛ, проложенную непосредственно в земле, воздействует множество факторов, вызывающих в изоляции сложные процессы. Следствием этих процессов являются постепенные и необратимые изменения свойств изоляции, приводящие к её старению и последующему пробоя вне зависимости от типа изоляции. Процесс старения КЛ оценивается по изменению контролируемых показателей, которые отражают ресурс. В диссертационной работе дано описание факторов, воздействующих на изоляцию в процессе эксплуатации, приведена краткая характеристика, перечислены преимущества и недостатки методов, с помощью которых может быть проведена оценка состояния изоляции.

Для выявления степени значимости различных факторов в зависимости от времени, определения механизма их воздействия на изоляцию в процессе эксплуатации, а также составления прогноза повреждаемости городских КЛ был собран статистический материал. Исходные данные получены при анализе паспортов на КЛ напряжением 6–10 кВ с бумажной пропитанной изоляцией за 76 лет эксплуатации и общей протяжённостью 994 км, которые проложены непосредственно в земле (2054 шт.); актов на монтаж муфт (6523 шт.); трасс прокладки КЛ (2054 шт.); диспетчерских журналов, отчётов о метеорологических условиях на территории г. Челябинска за 14 лет. В качестве исследуемых величин были приняты: число пробоев КЛ ($y = 3002$ шт.); календарный срок службы изоляции от момента прокладки до пробоя (μ); среднемесячные климатические параметры: температура на поверхности грунта (t_1), температура в грунте на глубине 0,8 м (t_2), количество выпавших осадков (q). В качестве состояния изоляции рассматривались рабочее состояние и состояние пробоя. Все факторы были разделены на три группы: обусловленные проектными решениями, эксплуатационные и климатические.

Первая группа факторов, включающая в себя глубину и траекторию прокладки КЛ, пересечение с подземными коммуникациями и проезжей частью, является практически постоянной для уже существующей сети или редко изменяемой в связи с реконструкцией и благоустройством города.

Для выявления степени влияния этих факторов применён дисперсионный анализ, оценивающий значимость различия между средними значениями сроков службы изоляции для групп: а) глубина прокладки (объём выборки = 134 шт.) – отказы кабеля на глубине до 0,8 м или ниже 0,8 м; б) траектория прокладки (объём выборки = 226 шт.) – отказы кабеля на прямом участке или на повороте; в) пересечения с городскими коммуникациями (объём выборки = 226 шт.) – отказы кабеля без пересечения с чем-либо, отказы кабеля в местах пересечения с подземными коммуникациями или с проезжей частью. При расчётах приняты следующие допущения:

1. Переменные, входящие в группы, независимы, принимают только дискретные значения и относятся к номинальной или порядковой шкале.

2. Срок службы изоляции представляем в виде $\mu_{jl} = a_j + \varepsilon_{jl}$, $j = 1, 2, 3$, $l = 1, \dots, n$, где a_1, a_2, a_3 – неслучайные неизвестные величины, являющиеся результатом действия фактора, ε_{jl} – независимые случайные величины, имеющие нормальное распределение с нулевым средним и общей для всех дисперсией σ^2 .

Значимость факторов определялась по F-критерию; граница значимости принята $p = 0,05$.

На примере имеющихся данных по кабельным сетям г. Челябинска анализ показал, что сочетание факторов глубины и траектории прокладки КЛ существенно влияет на срок службы её изоляции. В течение годового цикла существуют подвижки грунта, которые приводят к механическим воздействиям на кабель. Деформация грунта во время его оттаивания и промерзания является одной из существенных причин весенне-осенних пиков повреждаемости КЛ. Для рассматриваемой территории характерно, что в период с апреля по октябрь пробой изоляции происходит в широком интервале глубин, а в зимний период этот интервал сужается, причём большая часть отказов наблюдается на глубинах до 1 м. Механические воздействия на кабель при прокладке на разных глубинах становятся наиболее опасными на поворотах трассы, ограниченных допустимым радиусом изгиба КЛ. В этом случае помимо возникающих на изгибе усилий, работающих на сжатие и растяжение конструкции, происходит кручение КЛ. Изменяется конфигурация электромагнитного поля. При сравнении повреждаемости изоляции на прямых участках и поворотах для разных РЭС получено, что число пробоев на изгибе, приходящееся на 1 км кабеля, до 1,5 раз больше по сравнению с повреждаемостью на прямых участках.

Вторая группа факторов, включающая в себя токи рабочего режима, токи короткого замыкания (к.з.), проведение земляных и наземных работ, а также качество работы электромонтёров-кабельщиков, определяет уровень эксплуатации кабельных сетей и обладает большой динамикой. Современные кабельные сети в нормальном режиме эксплуатируются с нагрузкой 50 – 90 % от длительно допустимого тока, поэтому протекание рабочих токов в исследуемых сетях практически не вызывает преждевременного старения

изоляции. На процесс старения влияет расположение КЛ в схеме. По расчёту среднего времени наработки изоляции до отказа получено, что у головных КЛ (186 месяцев) оно меньше, чем у остальных КЛ (200 месяцев), что связано с термическим воздействием токов к.з., которому первые подвергаются чаще. Таким образом, ресурс кабелей определяется не только собственным состоянием изоляции, но и состоянием изоляции кабелей, расположенных ниже по схеме электрической сети, находящихся в одной радиальной ветке.

Помимо режимных параметров, которыми можно управлять, в процессе эксплуатации возникают аварийные ситуации под действием факторов, изменения которых зачастую носят случайный характер, а именно, дефекты монтажа и механические повреждения при проведении строительных и ремонтных работ. По расчёту интенсивности отказов изоляции определено, что время выявления грубых дефектов составляет до трёх лет. В этот период приработки происходит до 15 % от всех повреждений изоляции кабеля в работе в ранее неповреждённом месте, причём, из них 55 % – в период до 1,5 лет. Данные цифры свидетельствуют о явных дефектах монтажа КЛ. Для оценки качества работы электромонтёра-кабельщика предложено использовать теорему гипотез, на основании которой определяется муфта, которая имеет наибольшую вероятность пробоя в зависимости от месяца её монтажа:

$$P(H_i | A) = \frac{P(H_i)P(A|H_i)}{\sum_{i=1}^{12} P(H_i)P(A|H_i)}, \quad (1)$$

где H_i – гипотеза о том, что отказавшая муфта смонтирована в i -м месяце, $P(A|H_i)$ – условные вероятности наступления пробоя (событие A) при осуществлении H_i -й гипотезы, $P(H_i) = 1/12$ – вероятности гипотез до пробоя.

Исходными данными для расчёта являются количество смонтированных каждым электромонтёром-кабельщиком и демонтированных в результате пробоя муфт.

Третья группа – климатические параметры (t_1, t_2, q), которые оказывают влияние как на первую, так и на вторую группу факторов и не зависят от персонала, проектирующего и эксплуатирующего кабельные сети. Климат (с греч. Κλίμα – наклон) – многолетний статистический режим погоды, характерный для данной местности в силу её географического положения.

Известно, что пробой изоляции не происходит мгновенно. Постепенное накопление и развитие дефектов занимает некоторое время, зависящее как от площади дефекта, так и от параметров окружающей среды. Кабель проложен непосредственно в земле, которая имеет разную структуру, уплотняемость, размываемость. Поэтому степень воздействия погоды на пропитанную бумажную изоляцию будет определяться свойствами грунта, которые зависят как от состава грунта, так и от характера городской постройки. Считая, что в городе встречается, в основном, техногенный грунт, образованный в результате деятельности человека, площадь каждого РЭС была разделена на территории с

определённым сочетанием внешних факторов, воздействующих на изоляцию. В рассматриваемых сетях выделено три территории.

Для территории с асфальтированным дорожным покрытием свойственно повышенное значение блуждающих токов и вибрации от рельсового и автотранспорта, а также изменение режима работы дорожной конструкции под действием климатических факторов. Здесь КЛ проложены, в основном, по прямой вдоль обочины или под дорогой в трубах. На территории дворов многоэтажных домов и территории учреждений сконцентрировано большое количество подземных коммуникаций, из-за чего появляются повороты трассы, ограниченные допустимым радиусом изгиба КЛ. Проведение строительных работ и работ по благоустройству города повышает риск механического повреждения кабеля из-за непосредственного порыва КЛ, последующей усадки грунта. Механические повреждения КЛ характерны и для территорий частного сектора, складов и гаражей. Эти территории, в основном, без асфальтового покрытия. Помимо человеческого фактора на изоляцию кабеля могут воздействовать подвижки грунтов при изменении климатических параметров. Кроме того, здесь появляются места скопления отходов, и происходит загрязнение грунта химическими веществами, применяемыми в гаражах.

Предполагая, что воздействие групп факторов, характерных для каждой территории прокладки КЛ, имеет установившееся значение, сформировавшееся на протяжении многих лет, деление кабельных сетей позволяет оценить уровень повреждаемости изоляции участков КЛ, попавших на рассматриваемую территорию. Ранее предлагалась статистическая модель, представляющая зависимость математического ожидания повреждений КЛ от времени по месяцам в течение года. Период наблюдения составлял 5 лет. На основе тригонометрической интерполяции был получен график зависимости числа повреждений КЛ от времени, описанный аналитическим выражением. Установлено, что повреждаемость КЛ в течение года не постоянна, а происходит с колебаниями. Существуют три пика, приходящиеся на апрель, июль и октябрь, снижающиеся соответственно. Данные, полученные по участку кабельных сетей г. Челябинска, не согласуются с предложенной моделью. На основании расчёта математического ожидания выявились три пика в мае, июле и октябре, причём наблюдался рост повреждаемости от пика к пику в отличие от предлагаемой модели.

Для составления математической модели повреждаемости изоляции КЛ 6–10 кВ предлагается отнести ряд пробоев изоляции к известному закону распределения дискретных величин и проверить соответствие статистических данных принятой гипотезе с помощью критерия Пирсона χ^2 . В качестве гипотез рассматривались геометрическое распределение, биномиальное распределение и распределение Пуассона. Хорошо согласующаяся гипотеза с рядом повреждений изоляции для каждого РЭС – это геометрическое распределение. Вероятность возникновения k пробоев согласно выдвинутой гипотезе о геометрическом распределении имеет вид:

$$P\{\xi = k\} = (1 - p_i)p_i^k, \quad (2)$$

где $p_i = (\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}) / (1 + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij})$ – вероятность возникновения пробоя в i -м месяце, $\xi = 0, 1, 2, 3, \dots$ – случайная дискретная величина; $k = 0, 1, \dots, K$ – прогнозируемое число пробоев; y_{ij} – число пробоев в i -м месяце j -го года; n – количество лет.

Максимально возможное число пробоев $k_{\max i}$ для каждого месяца с принятой надёжностью ν вычисляется, как:

$$k_{\max i} \geq \frac{\ln(1 - \nu)}{\ln p_i} - 1. \quad (3)$$

При этом доверительный интервал для найденного $k_{\max i}$ определяется решением неравенства:

$$P\{k_2 \leq k_{\max i} \leq k_1\} = p^{k_2} (1 - p^{k_1 - k_2 + 1}) \geq \nu. \quad (4)$$

По результатам проведённой работы на основании установленных зависимостей предлагается методика составления прогноза повреждаемости изоляции городских КЛ, представленная на рис. 1:

1. Из базы данных по кабельным сетям составляется выборка, включающая в себя данные по срокам службы кабеля в зависимости: от глубины прокладки КЛ ($\mu_{h < 0,7}$, $\mu_{h \geq 0,7}$), от траектории прокладки кабеля (μ_{np} , $\mu_{нов}$), от пересечения с объектами городских коммуникаций (μ_o , $\mu_{дор}$, $\mu_{ком}$).

2. С помощью дисперсионного анализа определяется значимость выделенных факторов.

3. Производится территориальное деление сетей на основании выявленного постоянства воздействующих на изоляцию факторов. Далее все расчёты для каждой территории проводятся отдельно.

4. Из выборки данных по количеству выпавших осадков (q) и числу пробоев (y), применяя корреляционный анализ, определяется интервал времени ψ_q , через который для рассматриваемой территории проявляется влияние увлажнения грунта на состояние изоляции.

5. Составляется выборка из числа пробоев изоляции кабелей (y_i) в зависимости от месяца и проводится выбор закона распределения повреждаемости изоляции. Для рассматриваемых кабельных сетей – это геометрическое распределение.

6. Согласно предлагаемому распределению вычисляются вероятности возникновения k пробоев в i -м месяце, которые справедливы при составлении прогноза на один год по данным предыдущих лет. Вычисляется максимально

возможное число пробоев $k_{\max i}$ для каждого месяца с принятой надёжностью ν и доверительный интервал для найденного $k_{\max i}$.

7. Модель на основе геометрического распределения предполагает установившийся процесс повреждаемости изоляции. После того, как становится известно фактическое число пробоев в i -м месяце в рассматриваемом году, его необходимо занести в модель, чтобы рассчитать вероятность возникновения пробоя для данного месяца в следующем году.

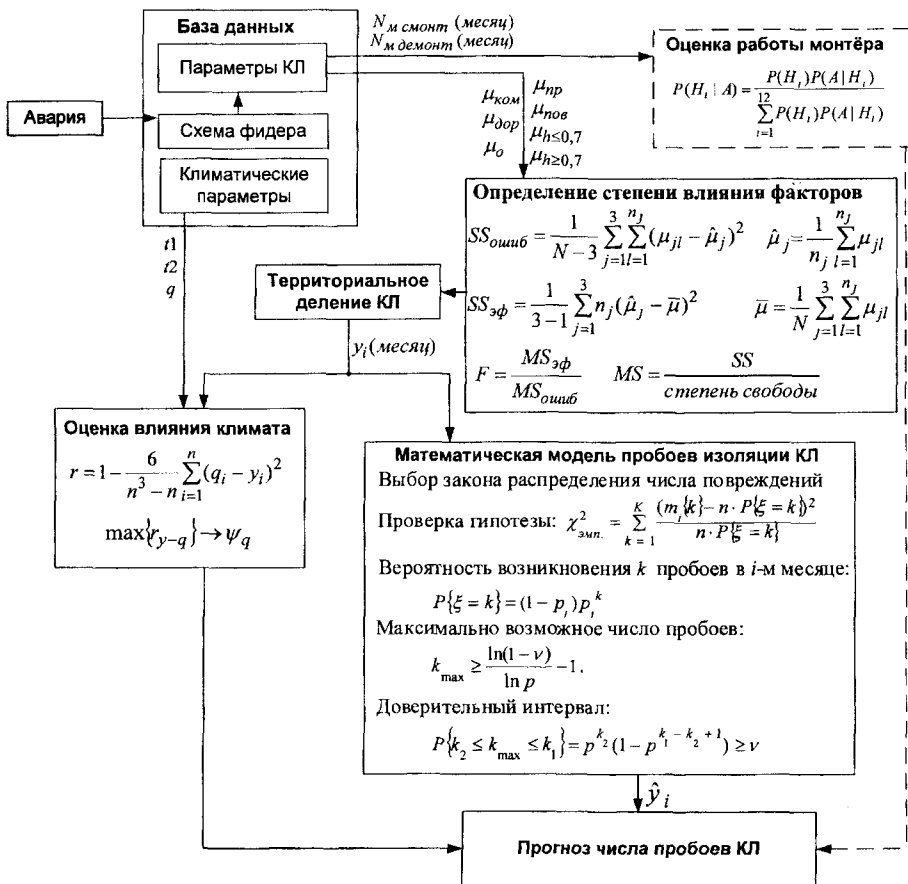


Рис. 1. Методика составления прогноза повреждаемости изоляции КЛ

Предложенная методика проверена и справедлива также при прогнозировании повреждаемости муфт. Для определения, какая именно муфта выйдет из строя, по теореме гипотез определяются вероятности пробоя муфт в

зависимости от месяца их монтажа для каждого электромонтёра-кабельщика, выполнявшего муфты на рассматриваемой территории.

Таблица 1

Апробация математической модели пробоев изоляции КЛ

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Территория РЭС													
$\frac{1}{n} \sum_i x_i$	0,29	0,32	0,35	0,48	0,65	0,39	0,65	0,68	0,84	1,16	0,32	0,58	
P_i	0,23	0,24	0,26	0,33	0,39	0,28	0,39	0,4	0,46	0,54	0,24	0,37	
$P\{\xi=k\}$	$k=0$	0,78	0,76	0,74	0,67	0,61	0,72	0,61	0,60	0,54	0,46	0,76	0,63
	$k=1$	0,17	0,18	0,19	0,22	0,24	0,2	0,24	0,24	0,25	0,25	0,18	0,23
	$k=2$	0,04	0,04	0,05	0,07	0,09	0,06	0,09	0,1	0,11	0,13	0,04	0,09
	$k=3$	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,02	0,04	0,04	0,05	0,07	0,01	0,03
	$k=4$	0	0	0	0,01	0,01	0	0,01	0,02	0,02	0,04	0	0,01
	$k=5$	0	0	0	0	0,01	0	0,01	0,01	0,01	0,02	0	0
	$k=6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0
$m\{k\}$	$k=0$	24	24	22	20	15	23	20	20	17	17	24	20
	$k=1$	5	5	7	8	13	6	5	6	8	5	5	6
	$k=2$	2	1	2	2	2	0	3	3	3	3	1	3
	$k=3$	0	1	0	1	1	2	3	0	1	2	1	2
	$k=4$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0
	$k=5$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
	$k=6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$\chi^2_{эмп}$	0,89	1,6	0,88	0,71	6,03	6,67	4,59	5,47	1,9	3,76	1,6	1,88	
$k_{max i}$	1,01	1,12	1,24	1,67	2,2	1,35	2,2	2,3	2,82	3,82	1,12	1,99	
$k_2 \leq k \leq k_1$	[0;2]	[0;2]	[0;2]	[0;2]	[0;3]	[0;2]	[0;3]	[0;3]	[0;3]	[0;4]	[0;2]	[0;2]	
$k_{факт}$	0	0	0	0	3	1	6	2	1	3	1	0	
Территория с асфальтированным дорожным покрытием													
$k_{max i}$	-0,1	0,38	0,07	0,23	1,01	0,65	0,38	0,23	0,89	1,01	0,4	0,65	
$k_2 \leq k \leq k_1$	0	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;2]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;2]	[0;1]	[0;1]	
$k_{факт}$	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	
Территория дворов многоквартирных домов и учреждений													
$k_{max i}$	0,86	0,28	0,28	0,59	0,73	0,59	1,37	1,49	1,61	1,96	0,59	1,12	
$k_2 \leq k \leq k_1$	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;2]	[0;2]	[0;2]	[0;2]	[0;1]	[0;2]	
$k_{факт}$	0	0	0	0	0	0	2	1	1	2	0	1	

Апробация разработанной методики проведена по всем РЭС г. Челябинска. В качестве примера приведены результаты расчёта по одному из РЭС в целом и

с учётом территориального деления: для территории с асфальтированной дорогой, для территории дворов многоэтажных домов и учреждений. Теоретические вероятности появления k пробоев для i -го месяца и число отказов $m_i \{k\}$, попавших в i -й месяц, сведены в табл.1.

Проверка гипотезы при уровне значимости $\xi = 0,05$ показывает, что $\chi^2_{эмп} \leq \chi^2_{табл}$, где $\chi^2_{табл} = 42,56$ при числе степеней свободы 29. Поэтому полагаем, что статистические данные хорошо согласуются с проверяемой гипотезой.

При составлении прогноза на 2007 год с надёжностью $\nu = 0,95$ получено, что в целом по РЭС фактическое количество пробоев в июле выходит за доверительный интервал прогнозируемого числа пробоев. Для отдельных же территорий – фактическое число пробоев входит в доверительный интервал. Разделение кабельных сетей на территории по сочетанию факторов позволяет повысить точность прогноза.

Проводя аналогичный расчёт по данным других РЭС, получено, что минимальная точность прогноза составляет 83,3 % в случае выхода в двух месяцах фактического числа пробоев за доверительный интервал.

Точность прогноза зависит от полноты и достоверности исходной информации. В диссертационной работе разработан алгоритм сбора и хранения информации, на основании которого создана электронная база данных в программе Microsoft Office Excel. Отличительными особенностями базы данных являются: деление каждой КЛ на участки по точкам, где увеличивается вероятность пробоя (муфта, изгиб кабеля, пересечение с подземными коммуникациями и проезжей дорогой), наличие персональных сведений об электромонтёрах-кабельщиках и их квалификации. Кроме того, в базе хранится информация по схемам фидеров, проектным, режимным и климатическим параметрам.

По результатам проведённой работы разработаны рекомендации по продлению срока службы КЛ, которые качественно улучшают условия электробезопасности обслуживающего персонала и населения:

1. Глубину прокладки КЛ необходимо выбирать ниже уровня промерзания грунта и распространить рекомендации п.2.3.31 ПУЭ не только на районы с многолетней мерзлотой.

2. Снизить сложность трассы за счёт увеличения допустимого радиуса изгиба кабеля и уменьшения числа поворотов кабеля.

3. При расчёте надёжности КЛ использовать фактическую, а не среднестатистическую частоту устойчивых отказов ω , характерную для рассматриваемых сетей.

4. Учитывать грунтово-климатические факторы при создании изоляции и проведении ресурсных испытаний.

5. Составлять вероятностно-территориальную карту кабельных сетей, на которой указывать наиболее опасные участки с максимальной повреждаемостью КЛ.

6. Изменить структуру сбора и хранения информации о проектных, эксплуатационных и климатических факторах на основании паспортов на КЛ, актов на монтаж муфт, трасс прокладки КЛ, диспетчерских журналов, отчетов о метеорологических условиях.

Применение методики составления прогноза и математической модели повреждаемости городских КЛ, а также алгоритма сбора и хранения информации позволит более эффективно планировать техническое обслуживание кабельных сетей. В частности, выявить степень влияния воздействующих факторов и их сочетаний, рассчитать время наработки элементов КЛ до отказа, составить прогноз повреждаемости кабельных сетей с учётом индивидуальных особенностей эксплуатации, спланировать график профилактических и ремонтных работ, создавать запас материалов и оборудования, а также улучшить условия электробезопасности за счёт предложенных и обоснованных рекомендаций по продлению срока службы городских КЛ. Персонализированный учёт производимых работ способствует повышению профессионализма электромонтёров-кабельщиков и ответственности их за качество выполненной работы, наиболее эффективному использованию руководством рычагов материального стимулирования персонала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе ретроспективного изучения имеющейся статистики отказов кабелей решена актуальная научно-техническая задача оценки состояния изоляции городских КЛ напряжением 6–10 кВ. Проведённые исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты и сделать выводы:

1. Разработана математическая модель повреждаемости изоляции городских КЛ на основе геометрического распределения пробоев изоляции. Данная модель, построенная на многолетних статистических данных о пробоях КЛ в зависимости от времени года, учитывает факторы, влияющие на состояние изоляции, и позволяет с заданной степенью надёжности составить прогноз повреждений кабельных сетей на ближайший год.

2. Разработана методика составления прогноза повреждаемости изоляции, основанная на делении кабельных сетей на группы в зависимости от территории прокладки. Такой подход позволяет повысить точность прогноза и оценить состояние изоляции отдельных участков КЛ.

3. Показано, что ресурс изоляции определяется не только собственным состоянием изоляции конкретной КЛ, но и состоянием изоляции кабелей, расположенных ниже по схеме электрической сети, находящихся в одной радиальной ветке.

4. Предложено учитывать человеческий фактор при составлении прогноза повреждаемости муфт на основании расчёта вероятностей пробоя муфт в зависимости от месяца их монтажа.

5. Разработан алгоритм сбора и хранения информации о климатических факторах, режимных параметрах и состоянии изоляции городских КЛ напряжением 6–10 кВ, на основании которого создана электронная база, отличительными особенностями которой являются: деление КЛ на участки по точкам, где увеличивается вероятность пробоя, а также наличие персональных сведений об электромонтёрах-кабельщиках и их квалификации.

6. Предложены и обоснованы рекомендации по улучшению условий электробезопасности в городских кабельных сетях, заключающиеся в: увеличении глубины прокладки КЛ ниже уровня промерзания грунта, увеличении допустимого радиуса изгиба кабеля и уменьшении числа поворотов кабеля, использовании фактической частоты устойчивых отказов ω , характерных для рассматриваемых сетей, учёте грунтово-климатических факторов при создании изоляции и проведении ресурсных испытаний, изменении структуры сбора и хранения информации о проектных, эксплуатационных и климатических параметрах.

7. Методика составления прогноза и математическая модель повреждаемости изоляции передана в филиал ОАО «МРСК Урала» «Челябэнерго ПО ЧГЭС» для применения её при эксплуатации КЛ. Результаты диссертационной работы используются Южно-Уральским государственным университетом в лекционном курсе «Передача и распределение электрической энергии» при обучении студентов специальностей 140204 («Электрические станции»), 140205 («Электроэнергетические системы и сети»), 140203 («Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»), а также в лекционном курсе «Основы электробезопасности» при обучении студентов специальности 280101 («Безопасность жизнедеятельности в техносфере»).

Научные публикации по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК

1. Коржов, А.В. Траектория прокладки силовых кабельных линий в современных городских условиях как фактор, влияющий на вероятность пробоя изоляции [Текст] / А.В. Коржов, Е.Ю. Юрченко // Электробезопасность. – 2006. – № 2. – С. 9–14.

2. Математическая модель повреждаемости изоляции силовых кабельных линий городских электрических сетей [Текст] / А.В. Коржов, А.И. Сидоров, Е.Ю. Юрченко, А.Б. Николаевский // Электрические станции. – 2008. – №8. – С. 40–47.

3. Коржов, А.В. Определение влияния грунтово-климатических параметров на изоляцию силового кабеля на основании статистических данных [Текст] / А.В. Коржов, Е.Ю. Юрченко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 10. – № 26(126). – С. 15–20.

Другие научные публикации по теме диссертации

4. Юрченко, Е.Ю. Задачи, связанные с увеличением уровня эксплуатационной надёжности кабельных линий напряжением 6–10 кВ [Текст] / Е.Ю. Юрченко // *Электробезопасность*. – 2007. – № 4. – С. 41–48.

5. Юрченко, Е.Ю. Мониторинг состояния изоляции силовых кабельных линий в процессе эксплуатации [Текст] / Е.Ю. Юрченко, А.В. Коржов // *Современные техника и технологии: XIII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых учёных: сб. материалов*. – Томск: ТПУ, 2007. – Т. 1. – С. 138–140.

6. Коржов, А.В. Вероятностная оценка влияния факторов, сказывающихся на состоянии изоляции силовых кабельных линий в процессе эксплуатации [Текст] / А.В. Коржов, Е.Ю. Юрченко // *Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: II Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сб. материалов*. – Тольятти: ТГУ, 2007. – Ч. 1. – С. 131–133.

7. Коржов, А.В. Методика сбора статистической информации для составления модели повреждения изоляции силовых кабельных линий [Текст] / А.В. Коржов, Е.Ю. Юрченко // *Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Всероссийская научно-техническая конференция: сб. материалов*. – Уфа: УНГТУ, 2007. – Т. 2. – С. 200–207.

8. Юрченко, Е.Ю. Статистические показатели надёжности элементов кабельных линий 6–10 кВ [Текст] / Е.Ю. Юрченко, А.В. Коржов // *Современные техника и технологии: XIV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых учёных: сб. материалов*. – Томск: ТПУ, 2008. – Т. 1. – С. 123–125.

9. Коржов, А.В. Анализ динамики повреждений изоляции кабельных линий 6–10 кВ на основе статистики [Текст] / А.В. Коржов, Е.Ю. Юрченко // *Дальневосточная весна – 2008: Международная научно-практическая конференция в области экологии и безопасности жизнедеятельности: сб. материалов*. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2008. – С. 94–97.

10. Коржов, А.В. Комбинированное воздействие эксплуатационных факторов на изоляцию силового кабеля [Текст] / А.В. Коржов, Е.Ю. Юрченко // *Наука – производство – технологии – экология: Всероссийская научно-техническая конференция: сб. материалов*. – Киров: ВятГУ, 2008. – Т. 3. – С. 140–142.

11. Юрченко, Е.Ю. Использование вероятностно-статистических методов при оценке текущего состояния изоляции кабельных линий [Текст] / Е.Ю. Юрченко, А.В. Коржов // *Охрана труда и социальная защита работников: Международная научная конференция: сб. материалов*. – Киев: НТУУ «КПІ», 2008. – С. 501–504.

12. Юрченко, Е.Ю. Алгоритм сбора и хранения информации о состоянии изоляции силовых кабельных линий напряжением 6 – 10 кВ на предприятиях электрических сетей [Текст] / Е.Ю. Юрченко, А.В. Коржов // *Безопасность и*

экология технологических процессов и производств: Всероссийская научно-практическая конференция: сб. материалов. – Ростовская область, п. Персиановский: ДонГАУ, 2008. – С. 362–365.

13. Юрченко, Е.Ю. Влияние условий эксплуатации кабельных электрических сетей на состояние изоляции [Текст] / Е.Ю. Юрченко, А.В. Коржов, А.И. Сидоров // Проблемы управления безопасностью сложных систем: XVI Международная конференция: сб. материалов. – М.: РГГУ, 2008. – С. 262–265.

14. Юрченко, Е.Ю. Функции обслуживающего персонала в обеспечении снижения аварийности кабельной сети [Текст] / Е.Ю. Юрченко // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Всероссийская научно-техническая конференция: сб. материалов. – Уфа: УНГТУ, 2009. – Т. 2. – С. 247–249.

15. Юрченко, Е.Ю. Влияние глубины прокладки кабельных линий на повреждаемость городской сети [Текст] / Е.Ю. Юрченко // Энергетика в современном мире: IV Всероссийская научно-практическая конференция: сб. материалов. – Чита: ЧитГУ, 2009. – Ч. I. – С. 147–153.

16. Юрченко, Е.Ю. Математическая модель повреждаемости изоляции силовых кабельных линий городских электрических сетей [Текст] / Е.Ю. Юрченко // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской обл.: сб. рефератов научно-исследовательских работ студентов. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2008. – 1 с.

17. Математическая модель оценки количества пробоев изоляции силовых кабельных линий: свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 10298 / А.В. Коржов, Е.Ю. Юрченко. – № 50200800708; заявл. 31.03.2008; опубл. 07.04.2008; Инновации в науке и образовании № 3(38). – 1 с.