

05.09.03  
Т 761

*На правах рукописи*



**Трофимова Светлана Николаевна**

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6–35 кВ ПУТЁМ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ  
РЕЖИМА НЕЙТРАЛИ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Челябинск

2010

V  
H252

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
**Сидоров А.И.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Четошникова Л.М;**  
доктор технических наук, профессор  
**Возмилов А.Г.**

**Ведущее предприятие** – государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Защита состоится 25 марта 2010 г., в 10 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 "19" февраля 2010 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) 267-90-65, e-mail: [trofimova\\_sn@mail.ru](mailto:trofimova_sn@mail.ru)

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



**Ю.С. Усынин**

441618

0628332

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Повышение надёжности электроснабжения потребителей является приоритетным направлением развития современной электроэнергетики, устойчивое функционирование которой во многом определяется надёжной и качественной работой электрических сетей 6–35 кВ, работающих, как правило, в режиме изолированной нейтрали.

Надёжная работа электрической сети, способная обеспечить непрерывное снабжение потребителей энергией требуемого качества и безопасность электроснабжения, существенным образом зависит от решения вопросов предупреждения отказов элементов воздушных линий (ВЛ), работающих в условиях загрязнения, увлажнения, динамических и термических перегрузок.

По данным опыта эксплуатации известно, что до 80% всех нарушений электроснабжения потребителей приходится именно на электрические сети 6–35 кВ с изолированной нейтралью, причем основной причиной повреждений электрооборудования являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), в том числе дуговые.

Горение заземляющих дуг как в сельских электрических сетях 6–35 кВ, снабжающих потребителей преимущественно по воздушным линиям электропередачи (ЛЭП), так и в городских электрических сетях, имеющих в своём составе смешанные воздушно-кабельные линии, может сопровождаться опасными тепловыми и механическими воздействиями на электрооборудование ЛЭП.

В эксплуатационных условиях за счёт термического действия дуги на провод ВЛ возможны оплавление или полный пережог провода, что либо увеличивает вероятность перехода дугового замыкания в многофазное КЗ с отключением сети, либо приводит к множественным пробоям изоляции на поврежденной фазе.

Обрыв одной и более проволок верхнего повива, видимый с земли, является дефектом, требующим обязательного устранения при ремонте. Пережог и последующее падение провода ВЛ на землю приводит к перерывам в электроснабжении, сопровождающимися материальным ущербом, создаёт опасную ситуацию для жизни людей или животных, оказавшихся вблизи места замыкания, а также пожароопасную ситуацию.

Механизм разрушения фазного провода ВЛ при воздействии на него электрической дуги при дуговом замыкании до сих пор в полной мере не изучен. Не проведено обстоятельных исследований по определению времени пережога фазного провода ВЛ при воздействии на него электрической дуги. Поэтому проведение научных исследований влияния электрической дуги на механизм и скорость разрушения фазного провода ВЛ при дуговом замыкании является актуальным.

Негативные последствия воздействия электрической дуги на фазный провод ВЛ, а также необходимость ограничения аварийных воздействий на электрическую сеть приводят к задаче повышения скорости обнаружения, ликвидации, а по возможности и к недопущению

ГОРНО-УЛЬЯНОВСКИЙ  
ГОС. УНИВЕРСИТЕТ  
НАУЧНАЯ

однофазного дугового замыкания, что может быть достигнуто изменением режима нейтрали электрических сетей.

**Цель работы** – обоснование режима нейтрали электрических сетей 6–35 кВ, обеспечивающего повышение надёжности электроснабжения.

**Идея работы** – выявление механизма и скорости пережога фазных проводов электрических сетей 6–35 кВ.

**Научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. При воздействии электрической дуги пробой оксидной плёнки и возникновение разрушений на проводе ВЛ возможны при токах ОЗЗ менее 1 А.

2. Режим горения электрической дуги определяется процессом образования оксидной плёнки на поверхности фазного провода ВЛ.

3. Результаты анализа влияния различных факторов на работоспособность элементов электрической сети 6–35 кВ.

4. Математическая модель определения скорости и объёма разрушения провода ВЛ при дуговом замыкании.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается большим объёмом статистических исследований (997 инцидентов в работе электрических сетей 6–35 кВ за период 1995–2007 гг.), корректным применением аппарата математической статистики и динамических математических моделей, достаточно большим объёмом экспериментальных исследований, использованием стандартных методов обработки экспериментальных данных и их удовлетворительным совпадением с результатами математического моделирования.

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

– впервые получены зависимости для расчёта времени пережога фазного провода ВЛ при воздействии на него электрической дуги;

– исследован механизм разрушения алюминиевого провода ВЛ при воздействии на него электрической дуги при дуговом замыкании и выявлены условия её стабилизации;

– предложена математическая модель, позволяющая анализировать время, скорость и объём разрушения провода ВЛ при изменении значений тока, длины электрической дуги, времени дугового разряда и получать оценку параметров его разрушения;

– на основе теоретических и экспериментальных исследований обоснована необходимость учёта пережога фазного провода ВЛ при реализации мероприятий, повышающих надёжность электроснабжения.

**Практическое значение работы.**

Полученные количественные характеристики влияния внешних факторов на работоспособность элементов электрической сети 6–35 кВ, выведенные зависимости влияния природно-климатических факторов на интенсивность отказов, а также результаты анализа влияния величины тока ОЗЗ на повреждаемость электротехнического оборудования 6–35 кВ могут быть использованы в ОАО «МРСК Урала» филиала «Челябэнерго» производственного отделения «Златоустовские электрические сети» для

снижения аварийности, вызванной дугowymi замыканиями, повышения безопасности и надёжности электроснабжения.

### **Реализация выводов и рекомендаций работы.**

Научные положения, выводы и рекомендации переданы для использования в работе в ОАО «МРСК Урала» филиала «Челябэнерго» производственного отделения «Златоустовские электрические сети», используются филиалом ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» в г. Златоусте в лекционных курсах «Электроснабжение городского хозяйства», «Электроснабжение промышленных предприятий», «Безопасность жизнедеятельности» при обучении студентов специальности 140610 («Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»).

**Апробация работы.** Основные материалы и результаты диссертационной работы были доложены, рассмотрены и одобрены:

– на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности: интеграция науки и практики» (Ставрополь, 2008);

– на двух Всероссийских ежегодных научно-технических конференциях «Наука – Производство – Технология – Экология» (ВятГТУ, Киров 2008, 2009);

– на Всероссийской научно-технической конференции «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий» (Уфа, 2009);

– на IV Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика в современном мире» (Чита, 2009);

– на IV международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» (Челябинск, 2009);

– на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (2007 – 2009 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, 1 из них в журнале, рекомендованном ВАК.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 239 страницах машинописного текста, содержит 102 рисунка, 41 таблицу, список используемой литературы из 160 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.

Распределительные сети 6–35 кВ, от надёжности работы которых в значительной мере зависит безаварийность электроснабжения потребителей, имеют в своем составе ВЛ протяженностью около 50% от общей протяженности линий электропередачи 0,4–110 кВ и характеризуются тяжёлым режимом работы электротехнического оборудования.

Значительный вклад в теоретические и экспериментальные исследования ОЗЗ в распределительных сетях 6–35 кВ и процессов горения электрической дуги внесён такими учёными, как Н.Н. Беляков, Р. Вильгейм, Ч.М. Джуварлы, А.Г. Долгополов, Г.А. Евдокунин, М.Е. Заруди, К.П. Кадомская, А. Касси, С.М. Крижанский, Ю.А. Лавров, Ф.А. Лихачев, О. Майр, О.Я. Новиков, В.К. Обабков, Дж. Петерс, У. Петерсен, О.А. Петров, А.А. Рейхердт, Л.И. Сарин, И.М. Сирота, Х. Слепьян, М. Уотерс, Ю.В. Целебровский и др. Однако большое количество влияющих на работу электрических сетей факторов постоянно порождают новые проблемы, решение которых определяет надёжность работы электрических сетей.

В значительной степени надёжность работы электрических сетей определяется надёжностью элементов ВЛ. Это свойственно не только сельским электрическим сетям, выполняемым преимущественно воздушными линиями, но и городским. Несмотря на то, что характерной особенностью городских распределительных сетей является снабжение потребителей по кабельным линиям, ВЛ применяются, в основном, на окраинах городов, а также в районах застройки до пяти этажей, составляя 15–40% общей протяженности.

Для получения полной и достоверной информации о надёжности работы распределительных электрических сетей, выявления причин возникновения и развития нарушений, установления различных факторов на элементы электрической сети был проведён анализ данных по каждому инциденту в работе электротехнического оборудования, включающий в себя анализ повреждений оборудования, недостатков его эксплуатации, проекта, изготовления. Исследование отказов в работе электрических сетей осуществлялось на основе анализа повреждаемости электротехнического оборудования электрических сетей 6–35 кВ ОАО «МРСК Урала» филиала «Челябэнерго» производственного отделения «Златоустовские электрические сети» за период 1995 – 2007 г.г. суммарной протяженностью около 3 тыс. км, обслуживающее сельскохозяйственные и городские потребители.

Результаты анализа показали, что как в сельских, так и в городских электрических сетях более 50% причин повреждений с большой долей вероятности обусловлены дугowymi замыканиями (табл. 1), около 40% повреждений электрооборудования происходит по причине природно-климатических воздействий, в т.ч. около 30% повреждений – по причине воздействия различных стихийных явлений, причём их распределение в течение года неравномерно.

Почти в 90% случаев отказы сопровождаются повреждениями их элементов, 60% приходится на ВЛ, причём в сельских электрических сетях – 74%, в городских – 26%, половина из которых приходится на провода ВЛ. Повреждения выражаются в виде эрозийного износа (41%), пережога провода (27%), различных механических повреждений (26%). Провод, подвергавшийся в процессе эксплуатации воздействию электрической дуги, более подвержен эрозийному износу, механическому повреждению, обрыву, влиянию внешних климатических факторов. Кроме того, к снижению

электрической прочности изоляции приводит её загрязнение в сетях, расположенных вблизи промышленных производств, что может вызвать поверхностное перекрытие, а природно-климатические факторы могут определять условия и степень интенсивности загрязнения изоляторов и проводов ВЛ, поверхность которых в процессе эксплуатации накапливает определенное количество дефектов.

Таблица 1

Распределение повреждений электротехнического оборудования  
по причинам

№	Причина повреждений оборудования	Доля отключений, % / порядок позиции	
		Сельские сети	Городские сети
1	<i>Коммутационные перенапряжения</i>	21,99/1	8,41/5
2	<i>Атмосферные перенапряжения (гроза)</i>	17,35/2	9,06/4
3	<i>Скорость ветра выше расчётной</i>	12,37/3	7,12/6
4	<i>Механические повреждения</i>	8,08/4	4,21
5	<i>Другие природно-климатические факторы</i>	5,84/5	5,49
6	<i>Старение изоляции</i>	3,95/7	18,45/1
7	<i>Пляска проводов</i>	1,55	*
8	Посторонние воздействия	5,15/6	10,36/3
9	Дефекты изготовления, ремонта и эксплуатации	*	11,98/2
10	Коррозионные процессы	3,44	4,21
11	Нарушение сроков и объёмов ремонтов	3,26	3,56
12	Внутренние отложения	3,10	2,59
13	Усталость металла, истирание	1,37	*
14	Прочие	12,55	14,55
15	Всего	100	100

С целью выявления внешних факторов, влияющих на отказы электрооборудования, была проведена оценка влияния природно-климатических факторов территории обслуживания сетей на повреждаемость электрооборудования 6–35 кВ на основе сведений о природно-климатических факторах территории обслуживания за рассматриваемый период, показавшая, что влиянию природно-климатических факторов, в основном, подвержены воздушные линии (44% нарушений), причём на долю проводов ВЛ приходится 29% повреждений всего электротехнического оборудования электрических сетей 6–35 кВ.

Проведённый анализ показал, что электрические сети работают в условиях больших перепадов температуры воздуха, повышенных ветровых воздействий, переходов температуры через ноль, что увеличивает количество отказов элементов ВЛ (рис. 1–3), а на аварийные отключения ВЛ в распределительных сетях в значительной мере влияет как характер внешних

климатических факторов, так и их интенсивность, причём наибольшее влияние оказывает их комплексное воздействие (рис. 4).



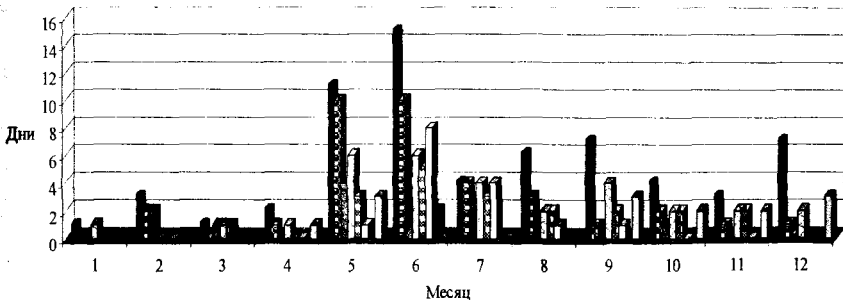
Рис. 1. Средняя месячная влажность воздуха, средняя скорость ветра и порывы ветра



Рис. 2. Среднемесячная скорость ветра, м/с



Рис. 3. Соотношение среднесуточной амплитуды температуры воздуха в районе обслуживания электрических сетей и средней температуры воздуха в дни возникновения нарушений в работе электрических сетей



- Количество повреждений элементов ВЛ
- ▣ Повреждения элементов ВЛ в дни со скоростью ветра > 10 м/с
- ▣ Повреждения элементов ВЛ в дни со скоростью ветра > 15 м/с
- ▣ Повреждения элементов ВЛ с осадками > 1 мм/сут
- ▣ Повреждения элементов ВЛ с осадками > 5 мм/сут
- ▣ Повреждения элементов ВЛ в дни с градом
- ▣ Повреждения элементов ВЛ в дни со скоростью ветра > 10 м/с
- ▣ Повреждения элементов ВЛ в дни со скоростью ветра > 15 м/с
- ▣ Повреждения элементов ВЛ с осадками > 1 мм/сут
- ▣ Повреждения элементов ВЛ в грозовые дни
- ▣ Дни с переходом температуры через 0°C

Рис. 4. Совокупность природных явлений в дни повреждений элементов ВЛ



Комплексный анализ сведений о природно-климатических факторах зоны обслуживания электрических сетей и анализ качества окружающей среды показали, что условия эксплуатации сетей рассматриваемого региона являются благоприятными для снижения уровня изоляции и, как следствие, возникновения электрической дуги при ОЗЗ.

Получены законы вероятностного распределения токов ОЗЗ (рис. 5, 6), математическое ожидание появления  $I_{OЗЗ}$  в городских сетях  $M = 9,18$ ; в сельских сетях  $M = 5,02$ , причём в городских электрических сетях наблюдается достаточно большой диапазон емкостного тока, распределение  $I_{OЗЗ}$  в сельских сетях достаточно неравномерно.

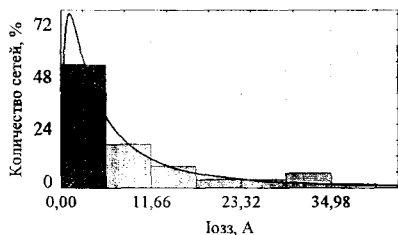


Рис. 5. Плотность вероятности логарифмически нормального распределения  $I_{OЗЗ}$  в городских электрических сетях

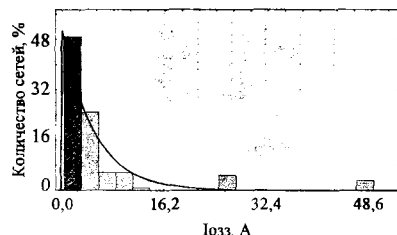


Рис. 6. Плотность вероятности экспоненциального распределения  $I_{OЗЗ}$  в сельских электрических сетях

Проведённый анализ влияния величин токов ОЗЗ на повреждаемость электротехнического оборудования в городских и сельских электрических сетях показал, что отключения потребителей по причине ОЗЗ, наблюдаемые в 84% случаях, в 61% случаях привели к повреждению электротехнического оборудования (43% всех повреждений электротехнического оборудования 6–35 кВ в сельских электрических сетях и 48% случаев повреждений в городских сетях).

В городских электрических сетях 84% повреждений электрооборудования имеют место в сетях с токами ОЗЗ до 15 А с преобладанием повреждений с токами замыкания 5–15 А. Отказы в сельских сетях в 87% случаев сопровождаются токами ОЗЗ до 5 А, основная доля (59%) приходится на сети с токами ОЗЗ в диапазоне 1,58...4,16 А. Наиболее подвержены повреждениям элементы ВЛ (70% повреждений), причём около 30% из них приходится на провода ВЛ.

Анализ причин отказов электрических сетей 6–35 кВ и повреждаемости электрооборудования привёл к задаче оценки влияния дуговых замыканий на работу электрических сетей и времени разрушения провода ВЛ при воздействии на него электрической дуги.

Проведённый анализ литературных источников показал, что обстоятельных исследований механизма разрушения провода ВЛ при дуговом замыкании с последующим определением времени его пережога до сих пор не проведено, что сказывается на точности расчётов: при определении времени пережога провода между данными разных авторов

расхождения отличаются более чем в  $10^4$  раз при одинаковых начальных условиях, что не позволяет достоверно определить время пережога провода ВЛ при дуговом замыкании.

С целью определения времени и механизма разрушения провода ВЛ при воздействии на него электрической дуги была проведена серия экспериментов, в ходе которых были испытаны образцы проволоки проводниковой части провода марки АС-70 и проведён анализ поверхности образцов (рис. 7).

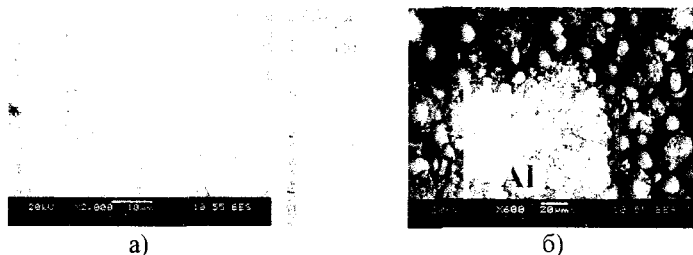


Рис. 7. Структура оксидной плёнки алюминиевого провода до (а) и после (б) дугового воздействия

Определены существенно влияющие факторы на время и скорость разрушения провода ВЛ при дуговом воздействии. Выявлено, что образцы, ранее не подвергавшиеся нагреву, воздействию агрессивных сред и т.п., более стойки к воздействию перемежающейся электрической дуги, следовательно, шероховатость поверхности провода ВЛ, подвергающегося воздействию внешних природно-климатических факторов, снижает коррозионную стойкость, что может привести к ускорению пробоя нарастающей оксидной плёнки и к уменьшению времени пережога провода. У провода, поверхность которого ранее была повреждена в результате механических воздействий, загрязнений, в результате точечного нагрева, при воздействии на него электрической дуги, может резко снизиться коррозионная стойкость, что приводит к ускорению его коррозионного растрескивания. Установлено, что режим горения электрической дуги определяется процессом образования оксидной плёнки на поверхности фазного провода ВЛ, а момент стабилизации дуги при  $I < 1$  А характеризуется возникновением разрушений на проводе.

Увеличению вероятности возникновения дугового замыкания и скорости пережога провода ВЛ способствует наличие на его поверхности повреждений окисной плёнки. Кроме того, присутствующие взвешенные твёрдые частицы в воздухе, попадая на поверхность провода ВЛ, могут влиять на скорость его разрушения в момент дугового замыкания, ускоряя или замедляя скорость его разрушения. Выявлено, что интенсивность образования оксидной плёнки провода ВЛ при воздействии на него электрической дуги изменяется при изменении температуры воздействия на провод, а ее толщина составляет 6...35 нм (рис. 8, 9).

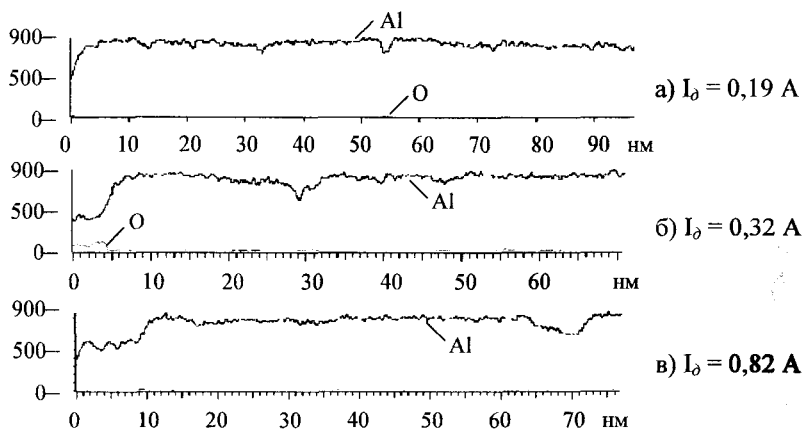


Рис. 8. Карты распределения химических элементов по поверхности сканирования шлифа поперечного среза образцов, подвергшихся воздействию электрической дуги

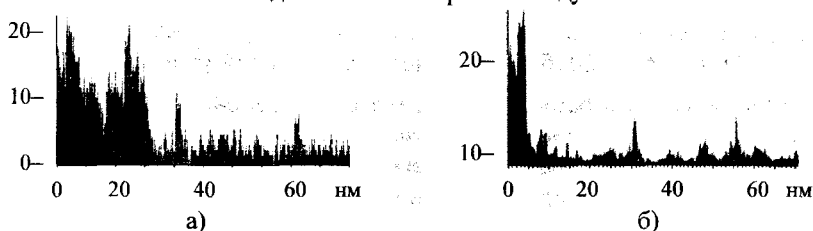


Рис. 9. Распределение кислорода по поверхности сканирования шлифа поперечного среза образцов, подвергшихся воздействию электрической дуги

Получен диапазон зависимостей времени образования оксидной плёнки  $[t_1 \dots t_2]$  толщиной  $x = (6 \dots 35)$  нм от температуры дуги  $T_d$ , диапазон зависимостей времени нарастания оксидной плёнки  $[t_3 \dots t_4]$  при воздействии на провод точечного источника тепла с температурой, соответствующей температуре растрескивания оксидной плёнки:

$$\begin{cases} t_1 = 35,836 \cdot e^{-0,0007 \cdot T_d}; \\ t_2 = 1459,310 \cdot e^{-0,0005 \cdot T_d}; \\ t_3 = 6,675 \cdot e^{0,104 \cdot x}; \\ t_4 = 32,458 \cdot e^{0,105 \cdot x}, \end{cases} \quad (2)$$

а также зависимость времени непосредственного пережога провода ВЛ от параметров дуги:

$$t = 12,984 \cdot S \cdot e^{(0,0068 \cdot l_d - 0,15649 \cdot I)}, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь сечения провода ВЛ,  $\text{мм}^2$ ,  $l_d$  – длина дуги, мм,  $I$  – значение начального действующего тока в момент замыкания, А.

На основании установленных в диссертации зависимостей были построены сглаженные поверхностные распределения количества повреждения проводов марки АС-70, АС-120, выраженные в процентах от его диаметра при изменяющихся значениях тока и длины дуги при воздействии электрической дуги на провод ВЛ в течение 2 часов (рис. 10).

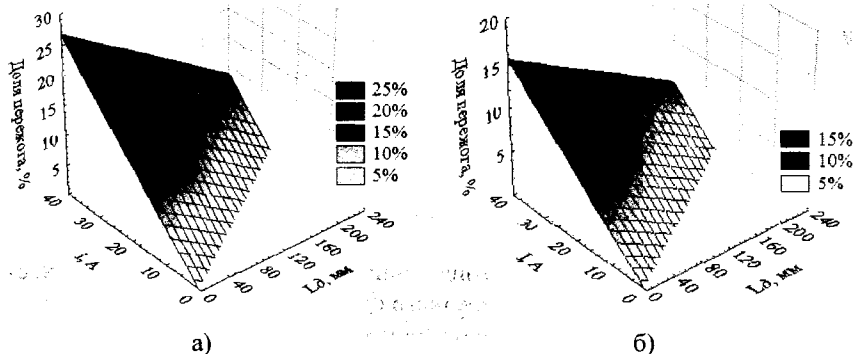


Рис. 10. Расчётное сглаженное распределение доли повреждения провода АС-70 (а) и АС-120 (б) в зависимости от значений тока и длины дуги

Получены номограммы для определения времени полного пережога провода ВЛ для дуги различной длины (рис. 11), времени разрушения проволоки токоведущей части верхнего повива провода ВЛ, являющегося дефектом, который требует обязательного устранения при ремонте (рис. 12) и соотношения токов ОЗЗ, времени полного разрушения провода ВЛ (рис. 13, а, б) и времени пережога проволоки токоведущей части проводов АС-70, АС-95 и АС-120 при дуговом замыкании (рис. 13, в, г).

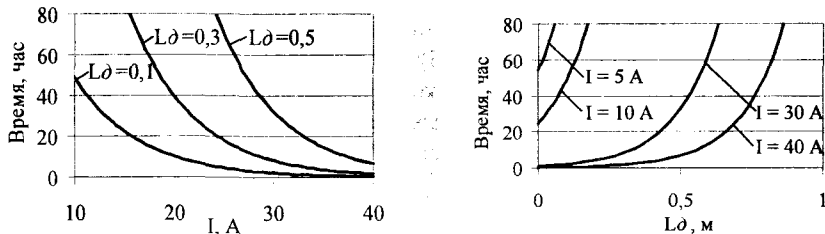


Рис. 11. Зависимость времени пережога провода АС-70 от параметров дуги

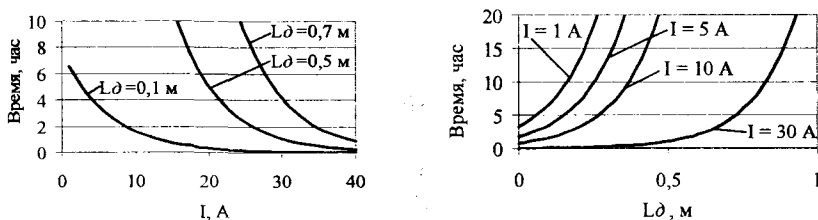


Рис. 12. Зависимость времени пережога проволоки наружного повива токоведущей части провода АС-70 от параметров дуги

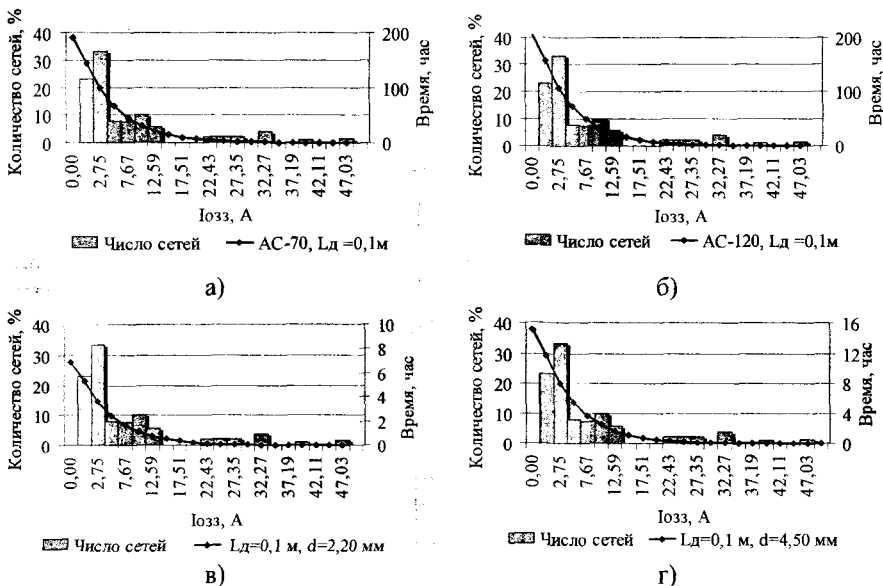


Рис. 13. Соотношение токов ОЗЗ в электрических сетях 6–35 кВ, времени полного разрушения провода ВЛ (а, б) и времени пережога проволоки токоведущей части проводов АС–70 и АС–120 при дуговом замыкании (в, г)

Обработанные данные позволили получить сочетание тока и длины дуги, при которых возможно полное разрушение провода ВЛ АС–70 и АС–120 в диапазоне времени 2–24 часа.

На основе проведённых экспериментов и их обобщения разработана математическая модель в пакете динамического моделирования VisSim, граф определения параметров разрушения провода представлен на рис. 14, где  $U$ ,  $U_C$ ,  $\Delta U$ ,  $I$ ,  $I_C$  – параметры электрической сети;  $\Delta R_s$  – изменение сопротивления пробоя воздушного промежутка при дуговом замыкании, Ом;  $R_0$  – сопротивление изоляции относительно земли, Ом;  $I_d$  – ток электрической дуги, А;  $l_0$  – длина электрической дуги, м;  $R_d$  – сопротивление дугового промежутка; Ом;  $\Delta P_{рас}$ ,  $\Delta P_{наг}$  – соответственно мощность рассеяния электрической дуги и мощность, затрачиваемая на нагрев и плавление провода ВЛ, Вт;  $t^\circ$  – температура провода ВЛ в точке воздействия на него электрической дуги,  $^\circ\text{C}$ ;  $\Delta R_p$  – изменение сопротивления поверхности провода ВЛ в результате его нагрева, окислирования и плавления, Ом;  $\Delta V$  – изменение объёма провода,  $\text{м}^3$ ;  $v$  – скорость разрушения провода ВЛ,  $\text{м}^3/\text{сек}$ .

Полученные значения скорости разрушения провода, отнесенные к коэффициентам, характеризующим задаваемые частные значения начального действующего тока в момент замыкания и длины дуги, позволяют сделать вывод, что начальные стадии горения электрической дуги характеризуются относительно небольшой скоростью разрушения (рис. 15), что объясняется

протеканием процесса интенсивного образования оксидной плёнки вследствие большой скорости нагрева провода ВЛ в месте контакта.

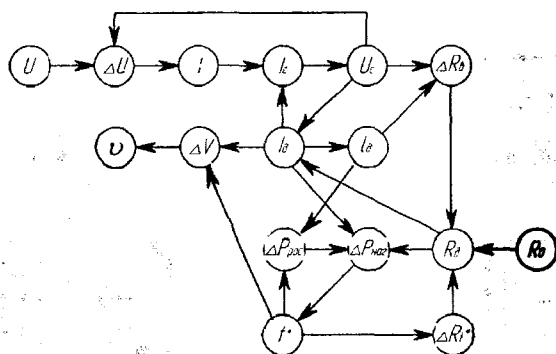


Рис. 14. Граф определения параметров разрушения фазного провода ВЛ

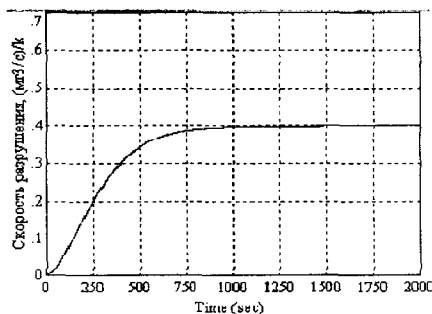


Рис. 15. Изменение скорости разрушения провода ВЛ с течением времени

Начальный период дугового замыкания, характеризующийся резким повышением температуры провода ВЛ в месте контакта с электрической дугой, и, как следствие, нарастанием оксидной плёнки, сопровождается повышением интенсивности разрушения. Если дуговое замыкание в этот период ликвидируется, то разрушения провода ВЛ, видимого с земли и требующего обязательного устранения при ремонте, не произойдет. Следовательно, в электрических сетях необходима быстрая ликвидация дуги замыкания на землю, что может быть достигнуто включением в нейтраль резистора.

Результаты исследования показали, что электрическая дуга в сетях 6–35 кВ способна привести к разрушению провода ВЛ. Показатели надёжности работы электрической сети, полученные по результатам обработки данных эксплуатации электросетевого оборудования 6–35 кВ, и показатели надёжности электроснабжения при дуговом замыкании в электрических сетях 6–35 кВ за этот же период показали, что экономический ущерб от нарушений в работе сельских электрических сетей в результате однофазного дугового замыкания составляет 16–45%, в городских электрических сетях – 27–63% от общего годового экономического ущерба.

Одним из способов повышения надёжности работы электрических сетей предлагается применение резистивного заземления нейтрали,

позволяющее ограничить аварийные воздействия при дуговых замыканиях, в результате которых интенсивность потока отказов на 100 км линий может быть снижена в 1,9 раз при снижении величины недоотпуска электроэнергии в среднем на 55,2% в год от общего количества недополученной энергии от всех нарушений в работе электрических сетей 6–35 кВ ОАО «МРСК Урала» филиала «Челябэнерго» производственного отделения «Златоустовские электрические сети».

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования надёжности работы электрических сетей 6–35 кВ при дуговом замыкании позволили обосновать необходимость учёта возможности пережога провода ВЛ в электрических сетях 6–35 кВ при воздействии на него электрической дуги при разработке организационных и технических мероприятий по обеспечению эффективного и безопасного функционирования электрических сетей 6–35 кВ, а расчёты технико-экономической эффективности перехода электрических сетей 6–35 кВ на работу в режиме с резистивным заземлением нейтрали показали целесообразность предлагаемых мероприятий, повышающих показатели надёжности работы электрических сетей 6–35 кВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании анализа данных, выполненных статистических, теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача повышения надёжности работы воздушных электрических сетей 6–35 кВ. Проведённые исследования позволяют отметить следующие основные результаты и сделать выводы:

1. Установлено долевое участие различных видов отказов в работе сельских и городских электрических сетей 6–35 кВ в общем их количестве, влияющих на работоспособность электротехнического оборудования, и основные причины их возникновения. Определено, что 68% нарушений в работе электрических сетей приходится на сельские сети, охватывающие более 80% всей территории обслуживания, причём повреждения электротехнического оборудования в сельских электрических сетях составляют 62% от общего числа повреждений. Показано, что 71% причин повреждений электротехнического оборудования в сельских сетях и 53% причин повреждений в городских сетях с большой долей вероятности обусловлены дуговыми замыканиями.

2. Полученные законы распределения токов ОЗЗ и проведённая оценка влияния величины тока ОЗЗ на повреждаемость электротехнического оборудования показали, что отключения потребителей по причине ОЗЗ происходят в 84% случаях, в 61% случаев режим ОЗЗ приводит к повреждению электротехнического оборудования, режим самоустраняющегося ОЗЗ составляет 19% случаев, 43% всех повреждений электротехнического оборудования 6–35 кВ в сельских электрических сетях и 48% повреждений в городских сетях являются следствием работы сетей в режиме ОЗЗ, в 24% случаев ОЗЗ сопровождаются различными внутренними перенапряжениями. В сельских сетях 87% повреждений электротехнического

оборудования 6–35 кВ происходит в сетях с токами ОЗЗ до 5 А, в городских сетях 75% повреждений характеризуются токами ОЗЗ до 15 А.

3. Выявлена зависимость повышения температуры алюминиевого провода ВЛ 6–35 кВ от скорости и толщины образования оксидной плёнки, способствующей созданию зоны на проводнике с меньшей электропроводностью, в которой накапливаются электрические потенциалы. Результатом снижения электропроводности является образование каналов микропробоя с последующей стабилизацией дуги, момент стабилизации дуги, режим горения которой определяется процессом образования оксидной плёнки на поверхности провода, соответствует пробоем оксидной плёнки и возникновению разрушений на проводе ВЛ.

4. Экспериментально определены зависимости времени разрушения провода ВЛ при воздействии на него электрической дуги от тока и длины дуги и от внешних факторов, а также получены соотношения распределения значений токов ОЗЗ в электрических сетях 6–35 кВ и времени полного разрушения провода в результате дугового воздействия.

5. Разработана модель определения скорости и объёма разрушения провода ВЛ при дуговом замыкании, позволяющая анализировать время, скорость и объём разрушения провода ВЛ при учёте изменения значений тока, длины электрической дуги, времени дугового разряда и степени загрязнения провода ВЛ и получать оценку параметров его разрушения.

6. Переход на резистивное заземление нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ в ОАО «МРСК Урала» филиала «Челябэнерго» производственного отделения «Златоустовские электрические сети» позволит повысить надёжность работы воздушных электрических сетей: снизить параметр потока отказов на 100 км в 1,94 раза, снизить вероятность отказа в 2,25 раз, что приведёт к уменьшению недоотпуска энергии в среднем в 2,39 раз в год и снижению годового экономического ущерба в 1,85 раз.

7. Результаты диссертационной работы переданы в ОАО «МРСК Урала» филиала «Челябэнерго» производственного отделения «Златоустовские электрические сети»; используются Южно-Уральским государственным университетом в лекционных курсах «Электроснабжение городского хозяйства», «Электроснабжение промышленных предприятий», «Безопасность жизнедеятельности» при обучении студентов специальности 140610 («Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»).

### **Научные публикации по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК**

1. Сидоров, А.И. Исследование причин нарушений в работе сельских электрических сетей 6–35 кВ [Текст] / А.И. Сидоров, С.Н. Трофимова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 4. – С. 29–31.



## Другие научные публикации по теме диссертации

2. Трофимова, С.Н. Сравнительная характеристика городских и сельских электрических сетей [Текст] / С.Н. Трофимова // Наука – производство – технологии – экология: Всероссийская научно-техническая конференция: сб. материалов. – Киров: Издательство ГОУ ВПО «ВятГУ», 2008. – В 7 т. – Т. 3 (ЭТФ). – С. 99–101.

3. Трофимова, С.Н. Анализ безопасности работы распределительной электрической сети на основе оценки ее надежности [Текст] / С.Н. Трофимова // Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности: интеграция науки и практики: Международная науч.-практич. конф.: сб. научных трудов. – Ставрополь: Изд-во СГУ, 2008. – С. 174.

4. Трофимова, С.Н. Анализ повреждаемости электрооборудования в сельских электрических сетях [Текст] / С.Н. Трофимова // Электробезопасность. – 2007. – № 2–3. – С. 33–43.

5. Трофимова, С.Н. Анализ повреждаемости электрооборудования в городских электрических сетях 6–35 кВ [Текст] / С.Н. Трофимова // Электробезопасность. – 2007. – № 4. – С. 33–41.

6. Трофимова, С.Н. Оценка влияния природно-климатических факторов на повреждаемость электрооборудования электрических сетей 6–35 кВ [Текст] / С.Н. Трофимова // Электробезопасность. – 2008. – № 1. – С. 11–20.

7. Трофимова, С.Н. Влияние величины тока однофазного замыкания на землю на повреждаемость электротехнического оборудования в электрических сетях 6–35 кВ [Текст] / С.Н. Трофимова // Электробезопасность. – 2008. – № 2–3. – С. 6–10.

8. Трофимова, С.Н. О факторах, влияющих на устойчивость горения электрической дуги в электрических сетях 6–35 кВ [Текст] / С.Н. Трофимова // Электробезопасность. – 2008. – № 4. – С. 25–29.

9. Трофимова, С.Н. Исследование однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6...35 кВ [Текст] / С.Н. Трофимова // Энергетика в современном мире: IV Всероссийская научно-практическая конференция: сб. материалов. – Чита: ЧитГУ, 2009. – Ч. I. – С. 153–157.

10. Трофимова, С.Н. Анализ отказов трансформаторов напряжения в электрических сетях 6–35 кВ [Текст] / С.Н. Трофимова // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Всероссийская научно-техническая конференция: сб. материалов: в 2 т. – Уфа: УНГТУ, 2009. – Т. 2. – С. 242–243.

11. Трофимова, С.Н. Условия прокладки силового кабеля как фактор, влияющий на состояние изоляции / А.В. Коржов, С.Н. Трофимова, А.И. Сидоров // Наука–производство–технология–экология: Всерос. науч.-техн. конф.: сб. материалов: в 3 т. – Киров: Издательство ГОУ ВПО «ВятГУ», 2009. – Т. 1. ФАВТ, ФПМТ, ЭТФ. – С. 218–221.

12. Трофимова, С.Н. Анализ механизма разрушения алюминия при дуговом замыкании [Текст] / С.Н. Трофимова // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: IV Международная науч.-практич.

13. Трофимова, С.Н. Математическая модель определения времени разрушения провода воздушной линии при дуговом замыкании [Текст] / С.Н. Трофимова // Электробезопасность. – 2009. – № 1. – С. 10–15.

14. Трофимова, С.Н. Повышение надёжности электроснабжения при резистивном заземлении нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ [Текст] / С.Н. Трофимова // Электробезопасность. – 2009. – № 2–3. – С. 3–8.

Трофимова Светлана Николаевна

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6–35 кВ ПУТЁМ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ  
РЕЖИМА НЕЙТРАЛИ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 15.02.2010. Формат 60x84 1/16. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1. Тираж 80 экз. Заказ 35/165

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.