Титов Дмитрий Евгеньевич. Мониторинг интенсивности гололедообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Титов Дмитрий Евгеньевич;[Место защиты: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.].- Саратов, 2014.- 150 с.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю. А.»

На правах рукописи

ТИТОВ Дмитрий Евгеньевич

МОНИТОРИНГ ИНТЕНСИВНОСТИ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И В КОНТАКТНЫХ СЕТЯХ Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Угаров Г. Г.

Саратов

2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИЗУЧАЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ 12
   1. Существующие способы и устройства мониторинга гололедных на­грузок на провода ВЛ 12
   2. Оценка возможности использования способов мониторинга голо­ледных нагрузок ВЛ в электротяговых сетях 22
   3. Постановка задачи исследования 29

Выводы 31

1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ СПОСОБ МОНИТОРИНГА ИНТЕН­СИВНОСТИ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ 32
   1. Необходимые и достаточные условия для определения начала обра­зования отложений гололеда на проводе 32
   2. Анализ состояния системы «провод-воздух» при гололедообразова­нии 39
   3. Определение максимально возможной массы отложений и интен­сивности ее нарастания на обесточенном проводе при отсутствии ветра 45
   4. Учет влияния направления и скорости ветра на интенсивность на­растания отложений на проводе 49
   5. Учет влияния напряженности электрического поля провода на ин­тенсивность нарастания отложений на проводе 53
   6. Определение максимально возможной массы отложений и интен­сивности ее нарастания на проводе под напряжением на ветру 61

Выводы 63

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ «ПРОВОД-ВОЗДУХ» В КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ 65
   1. Постановка задачи и планирование эксперимента 65
   2. Описание установки для моделирования процессов системы «про-

вод-воздух» и порядок подготовки проведения экспериментов 67

* 1. Методика проведения эксперимента 70
  2. Проверка гипотезы о существовании функциональной связи между весом отложений, точкой росы, точкой десублимации и температу­рой провода 75

Выводы 82

1. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИНТЕНСИВНОСТИ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕК­ТРОПЕРЕДАЧИ И В КОНТАКТНЫХ СЕТЯХ 83
   1. Архитектура системы мониторинга интенсивности гололедообразо­вания 83
   2. Функционирование системы МИГ на проводах воздушной линии электропередачи 86
   3. Функционирование системы МИГ на проводах контактной сети.. 90
   4. Натурные испытания модуля измерения температуры провода 93

Выводы 98

1. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИНТЕНСИВНОСТИ ГОЛОЛЕДООБ­РАЗОВАНИЯ НА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ 100
   1. Выбор критерия экономической эффективности. Методика расчета системного эффекта от внедрения систем мониторинга гололедооб­разования 100
   2. Анализ статистических данных о результатах работы систем мони­торинга гололедообразования 108
   3. Оценка технико-экономических показателей внедрения МИГ 114

Выводы 121

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 122

[СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 123](#bookmark26)

Приложение А: Алгоритм функционирования элементов функциональной

схемы работы системы обнаружения отложений для ВЛ 135

[Приложение Б: Акт внедрения модуля измерения температуры провода.... 143](#bookmark28)

Приложение В: Выписка из журнала отказов ВЛ-110 кВ № 423 и № 424

КЭС «Волгоградэнерго» 144

Приложение Г: Выписка из журнала плавки гололеда ВЛ-110 кВ №423 и №424 КЭС «Волгоградэнерго» 149

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования: эксплуатация воздушных линий электропередачи и электротяговых сетей в условиях экстремальных метеорологических воздей­ствий на их элементы.

Предмет исследования: мониторинг гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи и электротяговых сетей.

Актуальность диссертации: аварии ВЛ в более чем 40 энергосистемах за последние 30 лет нанесли большой экономический ущерб во всех отраслях народного хозяйства и коммунально-бытовой сфере. По данным фирмы ОРГ- РЭС за три года (1998-2000 гг.) гололед с ветром стал причиной до 37 % от об­щего числа падений железобетонных опор 35-110 кВ, а в линиях 330-750 кВ гололед в сочетании с ветром стал причиной до 12 % от общего числа обрывов проводов, до 42 % обрывов грозозащитных тросов и до 8 % обрывов гирлянд и разрушения изоляторов.

Несмотря на относительно небольшой процент отказов ВЛ при гололеде (от 8,1 % до 2,9 % в зависимости от напряжения ВЛ, по данным института «Энергосетьпроект»), эти отказы наносят наибольший ущерб народному хозяй­ству и имеют тяжелые социальные последствия. Они сопровождаются большим объемом разрушений и требуют значительного времени для восстановления ВЛ. Если при отказе по другим причинам среднее время восстановления не превышает одних суток, то восстановление ВЛ после гололедно-ветровых ава­рий требует 5-10 суток и даже более. Недоотпуск электроэнергии при таких авариях в отдельных регионах достигает 70-80 % общего годового аварийного недоотпуска.

Например, в Сочинских электрических сетях ОАО «Кубаньэнерго» в де­кабре 2001 г. общая протяженность поврежденных ВЛ напряжением 0,38-220 кВ составила 2,5 тыс. км., была полностью прекращена на длительное время подача электроэнергии в коммунально-бытовой сектор с населением 320 тыс. человек [13]. Серьезные повреждения от сильного гололеда (поломки опор ВЛ 330-500 кВ, разрушение изоляции, арматуры, обрывы проводов и грозозащит­ных тросов) на линиях электропередачи МЭС Юга произошли в 2003-2004 гг. В январе - феврале 2005 г. по той же причине был нанесен ущерб АО «Ростов- энерго» в виде поломок и падений пяти опор ВЛ 220 кВ, двух опор ВЛ 110 кВ и 1910 опор ВЛ 10 кВ, при этом 53 населенных пункта остались без электроэнер­гии [19]. Экономический ущерб от гололедных явлений 1993 года в Камышин­ских электрических сетях ОАО «Волгоградэнерго» составил более одного млрд. рублей [31], в ОАО «Саратовэнерго» более 10 млрд. рублей в ценах 1994 г. [32], в 2010-2011 годах в Поволжье и центральных регионах России составил более одного млрд. рублей.

В декабре 2010 года большой ущерб от «ледяного дождя» был причинен энергосистемам Центральной России и Поволжья. Только в Московской облас­ти без электроснабжения в 24 районах осталось 455 населенных пунктов с на­селением до 200 тыс. человек. Под отключение попали до 150 социально зна­чимых объектов, 14 больниц. В Московской области были обесточены 86 линий электропередач и 27 подстанций. Часть населенных пунктов оставалась без электроэнергии больше недели.

Сильный снегопад с дождем 5 декабря 2010 г. стал причиной обрывов линий электропередачи в 13 районах республики Татарстан, где расположены 967 подстанций, 267 населенных пунктов, в которых проживает 66 тысяч 920 человек. По данным фирмы «Ice Engineering» (США) в 1998 г. в США гололед стал причиной повреждения протяженных участков ЛЭП и нанес ущерб в раз­мере 5 млрд. долларов. Подсчитано, что только в Северной Америке ущерб, на­несенный электроэнергетической отрасли, превысил 20 млрд. долларов за по­следние 20 лет [48].

Для минимизации риска возникновения гололедных аварий сетевые службы организуют как можно более частый визуальный осмотр наиболее под­верженных гололеду линий или используют информационно-измерительные системы мониторинга гололедообразования.

Одним их первых, предложивших в 1947 г. для измерения и регистрации гололедных воздействий на ВЛ использовать гололедографы - механические самописцы, был профессор Бургсдорф В. В. [7]. В последующем техническая реализация систем мониторинга гололедообразования совершенствовалась Аб- жановым Р. С. [1], Аллилуевым А. А. [27], Байрамгуловым Ю. Ж. [3], Башкеви- чем В. Я. [4, 69], Будзко И. А. [6], Бучинским В. Е. [9], Дьяковым А. Ф. [14-16, 17-18], Дьяковым Ф. А. [19, 27], Засыпкиным А. С. [16, 20], Ишкиным В. Х. [22], Кузнецовым П. А. [24, 61, 56, 69], Левченко И. И. [17, 18, 28], Лившицем А. Л. [23], Молодцовым В. С. [88, 90, 93], Никифоровым Е. П. [26, 41-43], Ру­даковой P. M. [23, 47], Телегиным С. Ю. [51], Угаровым Г. Г. [64, 65, 68, 69], Цитвер И. И. [80], и др. [73-108].

В настоящее время существуют способы обнаружения отложений, осно­ванные на измерении плотности (проводимости) отложений на специальных поверхностях [89, 97], напряженностей электрического поля в точке гололедной муфты и за ее пределами [87], отраженного от поверхности провода светового сигнала [91, 94], а также степени поглощения радиоактивного излучения [38], на наведении от фазного провода электрического потенциала в приемной ан­тенне [81, 90, 95] и др. Практическое применение получили системы, основан­ные на измерении тяжения провода с гололедом [69, 78, 103, 106, 105], а также на явлениях затухания сквозного зондирующего ВЧ сигнала, импульсного ВЧ зондирования проводов ВЛ [18, 38]. Недостатками известных способов и уст­ройств является отсутствие возможности определения момента начала образо­вания отложений, интенсивности нарастания отложений в реальном времени и прогнозирования динамики изменения процесса гололедообразования.

Цель работы: разработка новой концепции мониторинга воздушных ли­ний электропередачи и электротяговых сетей в условиях экстремальных метео­рологических воздействий на их элементы, обеспечивающей повышенную чув­ствительность к интенсивности гололедообразования.

В соответствии с целью в работе были поставлены следующие основные задачи:

1. Систематизировать известные способы и устройства мониторинга го­лоледообразования на проводах, выявить достоинства и недостатки их исполь­зования. Определить лимитирующие факторы для надежности линии при про­движении обширного гололедного фронта и в соответствии с ними установить требования к системе мониторинга гололедных отложений.
2. Выявить необходимые и достаточные условия для начала образования отложений, вид зависимости между метеорологическими параметрами и интен­сивностью образования отложений, определить степень влияния направления и скорости ветра, напряженности электрического поля на интенсивность образо­вания отложений. Разработать математические модели для расчета максималь­но возможной массы отложений и интенсивности ее нарастания на проводе под напряжением на ветру.
3. Разработать алгоритмы работы системы мониторинга гололедообразо­вания для воздушных линий электропередачи и контактной подвески электро- тяговых сетей в соответствии с их специфическими особенностями.
4. Предложить варианты технической реализации системы мониторинга и провести их лабораторные и натурные испытания.
5. Разработать методику технико-экономического обоснования эффек­тивности внедрения систем обнаружения отложений.

Методы и средства исследований. В работе использованы теоретиче­ские и экспериментальные общенаучные методы. При разработке теоретиче­ской части исследований применены методы электродинамики, механики, рас­чета термодинамических параметров идеальных газов и смесей, теория физики атмосферы, элементы теории дифференцирования и интегрирования функций, методы оценки эффективности инвестиционных проектов. В экспериментах ис­пользованы методы теории планирования эксперимента, математической ста­тистики и теории вероятности.

На защиту выносятся следующие результаты и положения:

1. Предложена новая концепция мониторинга воздушных линий в усло­виях экстремальных метеорологических воздействий на их элементы, при кото­рой контролируются не гололедная муфта на проводе и ее размеры, а условия, приводящие к ее возникновению.
2. Установлено, что для однозначного ответа на вопрос о наличии или от­сутствии процессов гололедообразования достаточно знать температуру прово­да, а также относительную влажность и температуру воздуха.
3. Установлен вид зависимости между интенсивностью нарастания массы отложений, точкой росы, точкой десублимации и температурой провода.
4. Выявлена степень влияния ветра, а также напряженности электриче­ского поля провода на интенсивность нарастания отложений.
5. Разработана математическая модель гололедообразования, позволяю­щая определить плотность, максимально возможную массу отложений и интен­сивность ее нарастания по метеорологическим параметрам воздуха и темпера­туре провода.
6. Выявлена необходимость многократного замера температуры провода и расчета среднего арифметического ее значения в интервале времени между отправлением информации с поста диспетчеру.
7. Установлено, что для расчета системного эффекта необходимо учиты­вать снижение затрат на восстановление поврежденных ВЛ, затрат на органи­зацию выездов бригад, затрат на возмещение потерь электроэнергии при плав­ках и упущенной прибыли от реализации электроэнергии.

Научная новизна работы:

1. Выявлены условия для начала образования отложений на проводе, за­ключающиеся в снижении температуры провода ниже точки росы и точки де­сублимации, определяемых по влажности и температуре воздуха.
2. Выдвинута и доказана гипотеза о существовании функциональной за­висимости между интенсивностью нарастания массы отложений на обесточен­ном проводе, точками росы и десублимации, температурой поверхности прово­да при отсутствии ветра.
3. Предложены уравнения для определения плотности, максимально воз­можной массы отложений и интенсивности их образования, учитывающие тем­пературу провода, температуру и влажность воздуха, направление и скорость ветра, напряженность электрического поля провода. Уравнения легли в основу работы предложенного термодинамического способа мониторинга интенсивно­сти гололедообразования (МИГ).
4. Предложены варианты технической реализации и алгоритмы функцио­нирования системы МИГ.

Практическая ценность работы. Разработан принципиально новый термодинамический способ мониторинга интенсивности гололедообразования, позволяющий определять момент начала образования отложений гололеда, вид отложений, максимально возможную массу отложений и интенсивность ее на­растания в реальном времени. Система МИГ универсальна, может быть приме­нена на любом проводе, находящемся в воздухе. Она состоит из диспетчерского пункта и постов измерения и передачи. На посту должны быть установлены датчики направления и скорости ветра, температуры и влажности воздуха, тем­пературы провода. Предложена новая конструкция датчика температуры про­вода открытого типа для снижения инерционности в измерении температуры датчиком, что может быть полезным при контроле плавки гололеда. Предложе­на методика технико-экономического обоснования эффективности внедрения систем обнаружения отложений.

Внедрение результатов исследований. Результаты диссертации исполь­зованы в проекте внедрения на ВЛ-10 кВ № 13 ПС «ГНС-2» ПО КЭС филиала ОАО «МРСК Юга» «Волгоградэнерго» модуля измерения температуры прово­да в 2014 году.

Апробация работы: результаты исследований докладывались на сле­дующих конференциях:

- VIII Всероссийской научно-практической конференции «Инновацион­ные технологии в обучении и производстве» (КТИ (филиал) ВолгГТУ, г. Ка­мышин, 23-25 ноября 2011 г.);

* Международной научной конференции «Математические методы в тех­нике и технологиях» - ММТТ-25 «У.М.Н.И.К.» (СГТУ им. Гагарина Ю. А., г. Саратов, апрель 2012 г.);
* очной научно-технической экспертизе Всероссийского молодежного образовательного форума «Селигер-2013» (Тверская область, 14-21 июля) - призер, получены экспертные заключения;
* очной научно-технической экспертизе IV Всероссийского молодежного инновационного форума «МИЦ-2013» (Нижний Новгород, август 2013 г.) - призер, получены экспертные заключения;
* Международном бизнес-саммите «IBS 2013» в Нижнем Новгороде, в конкурсе инновационных проектов «Investor Demo Day» (Нижний Новгород, сентябрь 2013 г.);
* IV Международной научно-технической конференции «Электроэнерге­тика глазами молодёжи», проводимой ОАО «Системный оператор Единой энергетической системы» («СО ЕЭС») (НПИ РГТУ, г. Новочеркасск, 14-18 ок­тября 2013) - получены диплом победителя II степени, диплом участника за ак­туальный доклад;
* IX Международной молодежной научно-технической конференции сту­дентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014» (ИГЭУ им. В.И. Лени­на, г. Иваново, 15-17 апреля 2014 г.) - получен диплом победителя I степени;
* IX Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (КГЭУ, г. Казань, 23-25 апреля 2014 г.) - получен диплом победителя III степени.

Публикации. Результаты, обобщенные в диссертации, опубликованы в 15 печатных работах, в том числе 3 из них в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пя­ти глав с выводами, заключения, 4 приложений и списка литературы, вклю­чающего 112 наименований. Работа изложена на 150 страницах. Основная часть содержит 110 страниц машинописного текста, 38 рисунков и 16 таблиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы по диссертационной работе сводятся к следующему:

1. Анализ работы существующих систем мониторинга гололедообра­зования на воздушных линиях и контактных сетях выявил их существенные не­достатки в возможности раннего обнаружения и оценки интенсивности их рос­та, что определило направление исследования.
2. Выявлены условия для начала образования отложений на проводе, заключающиеся в снижении температуры провода ниже точки росы и точки де­сублимации, определяемых по влажности и температуре воздуха.
3. Выдвинута и доказана гипотеза о существовании функциональной за­висимости между интенсивностью нарастания массы отложений, точками росы и десублимации и температурой поверхности провода. Выявлен вид зависимо­сти и определен коэффициент пропорциональности между этими величинами.
4. Разработана математическая модель, позволяющая определить плот­ность, максимально возможную массу отложений и интенсивность ее нараста­ния по направлению и скорости ветра, напряженности электрического поля провода, температуре провода, а также температуре и влажности воздуха. Ма­тематическая модель легла в основу работы предложенного термодинамическо­го способа мониторинга интенсивности гололедообразования (МИГ).
5. Предложены и испытаны с положительным эффектом варианты техни­ческой реализации и алгоритмы функционирования системы МИГ для исполь­зования ее на ВЛ и КС.
6. Разработана методика технико-экономического обоснования эффек­тивности внедрения системы МИГ. Установлено, что внедрение системы МИГ является экономически обоснованным мероприятием со сроком окупаемости 7­8 месяцев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абжанов, Р. С. Исследование процесса гололедообразования на проводах ЛЭП [Текст] / Р. С. Абжанов // II-ая конференция молодых ученых-энергетиков: тез. докл. - Алма-Ата, 1972.
2. Амелин, А. Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара [Текст] / А. Г. Амелин. - М.: Химия, 1966. - 296 с.
3. Байрамгулов, Ю. Ж. Совершенствование сельских воздушных линий 6-10 кВ, подверженных динамическим нагрузкам [Текст]: дис... докт. техн. наук: 05.20.02 /

Ю. Ж. Байрамгулов. - СПб., 1993. - 281 с.

1. Башкевич, В. Я. Анализ динамических воздействий гололедно-ветровых нагрузок на элементы промежуточной опоры ВЛ-110 кВ [Текст] / В. Я. Башкевич, Г. Г. Угаров // Проблемы электроэнергетики: межвуз. науч. сб. - Саратов, 2005. - С. 38-41.
2. Башкевич, В. Я. Многоточечная система полуавтоматического сбора информации о гололедной обстановке на воздушных линиях территориальной электрической сети [Текст] / В. Я. Башкевич, М. П. Гапоненков // Энергосбережение в Саратов­ской области. - Саратов. - № 3(5), октябрь, 2001. - С. 16-17.
3. Будзко, И. А. Сигнализация о начале и интенсивности образования гололеда на ВЛ [Текст] / И. А. Будзко, И. М. Колмогорова // Энергетик. - 1979. - № 2. - С. 24­26
4. Бургсдорф, В. В. Сооружение и эксплуатация линий электропередачи в сильно

гололедных районах [Текст] / В. В. Бургсдорф. - М. - Л.: Государственное энерге­тическое издательство, 1947. - 196 с.

1. Бурцев, С. И. Влажный воздух. Состав и свойства: учеб. пособие [Текст] / С. И.

Бурцев, Ю. Н. Цветков. - СПб.: СПбГАХПТ, 1998. - 146 с.

1. Бучинский, В. Е. Гололед и борьба с ним [Текст] / В. Е. Бучинский. - Л.: Гидроме- теоиздат, 1960. - 192 с.