



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ ЛЭП

АЛЕКСАНДР САМАРИН

asamarin@zitic.ru

ВАСИЛИЙ МАСАЛОВ

Транспортировка электроэнергии от электростанции к потребителям является одной из важнейших задач энергетики. Электроэнергия поставляется преимущественно по воздушным линиям электропередачи (ЛЭП), которые состоят из кабельных линий и оборудования для преобразования энергии и согласования с нагрузкой. Эффективность и надежность передачи энергии определяется состоянием сетей электроснабжения. Мониторинг воздушных ЛЭП позволяет решить многие проблемы в этой области.

Потери энергии при передаче через воздушные электросети довольно высоки. Мощность теряется как на оборудовании, обеспечивающем преобразование энергии, так и на протяженных проводных линиях. Потери электроэнергии в проводах зависят от силы тока, поэтому

при передаче ее на дальние расстояния напряжение повышают с помощью трансформаторов, во столько же раз уменьшая силу тока, что при передаче той же мощности позволяет значительно снизить потери. Однако с ростом напряжения начинают происходить различные

разрядные явления, которые также вносят свой вклад в потери. Установленное на узловых станциях для перераспределения электроэнергии оборудование позволяет контролировать потоки энергии и их параметры, а также оценивать потери и качество электроэнергии.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ

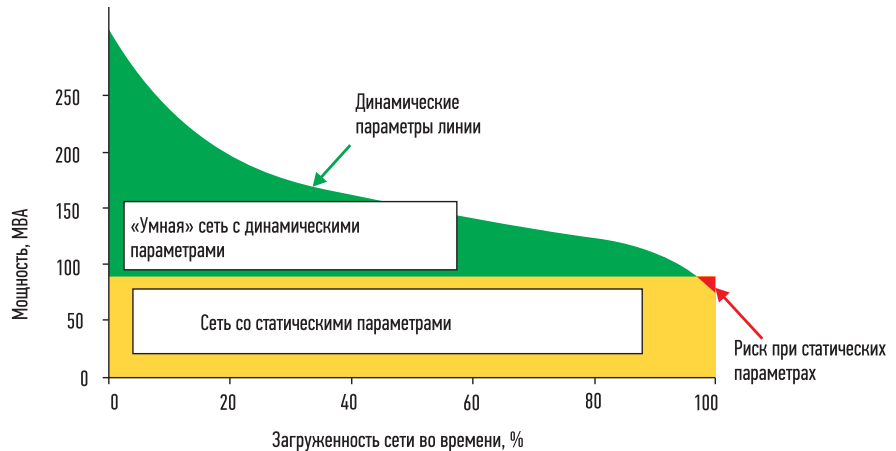
Можно выделить следующие типы потерь в воздушных ЛЭП:

- неизбежные потери за счет омического сопротивления проводов;
- потери на электромагнитное излучение;
- потери при возникновении коронного разряда на проводах и изоляторах;
- потери при возникновении резонансных явлений в проводе при рассогласовании с нагрузкой;
- утечки тока за счет нарушения изоляции;
- утечка тока при межфазных коротких замыканиях и замыкании на землю.

Наличие неблагоприятных погодных условий (дождь, снег, туман, сильный ветер, гололед) приводит к дополнительным потерям, в частности к возникновению коротких замыканий, к частичному повреждению и обрыву проводов.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ ЧЕРЕЗ ЛЭП

При транспортировке электроэнергии через конкретную ЛЭП регламентированы допустимые токовые нагрузки. При этом используются предельные значения тока, определяющие провис проводов выше критического. Эти данные взяты для самых экстремальных условий, которые более чем в 90% времени эксплуатации ЛЭП не встречаются. Следовательно, имеется ресурс для пропускания больших мощностей без нарушения регламента. То есть можно передавать дополнительную мощность (15–30%) практически в 90% времени эксплуатации. Наличие системы мониторинга позволяет без уменьшения регламента по надежности использовать этот дополнительный ресурс. Для этого необходимо контролировать уровень тока и температуру проводов по всей трассе и в соответствии с реальным состоянием линии динамически регулировать уровень передаваемой мощности (рис. 1).



ИСТОРИЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

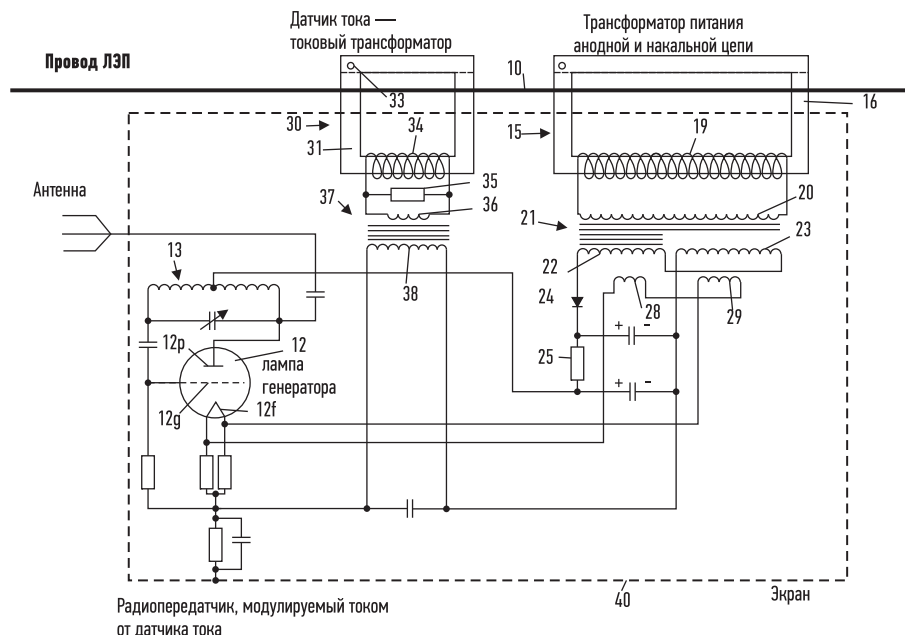
Телеметрический контроль параметров проводов ЛЭП был впервые предложен более 40 лет назад. Первым контролируемым параметром посредством телеметрического радиоканала стал ток в проводе. К этому времени относится появление американского патента Remote measuring system [6] («Системы дистанционного измерения тока в проводе с передачей измеренного значения по радиоканалу»). В предложенном решении использовалось питание устройства измерения от индукционного трансформатора за счет тока, протекающего в про-

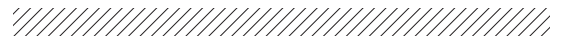
воде. Он измерялся через трансформаторный датчик тока. Сигнал модулировал сеточную цепь лампового передатчика (рис. 2).

Как видно на рисунке, в измерителе тока использовались измерительный и токовый трансформаторы для питания ламповой схемы (цепь анода и накала). Передатчик выполнен на одноламповом каскаде. Используется АМ ВЧ-сигнала посредством модуляции сеточного тока генератора передатчика. Позже появился патент, в котором уже использовалась транзисторная элементная база: System for transmitting to assemble point a signal that varies as function of the current flow in a high voltage conductor (Pat. № 3,428,896

РИС. 1. ▲ Эффективность передачи энергии в ЛЭП со статическими и динамическими параметрами

РИС. 2. ▼ Схема дистанционного измерителя тока с радиоканалом [6]





Измерительный блок на проводе ЛЭП

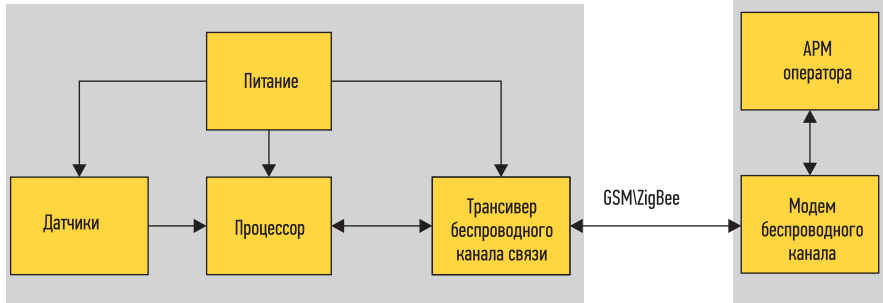


РИС. 3. ▲
Система мониторинга проводов ЛЭП

от 1966 г.). В последние 15 лет, благодаря развитию информационных технологий, стала возможна коммерческая реализация систем мониторинга проводов ЛЭП.

СТРУКТУРА СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ

В настоящее время во всем мире находят широкое применение различные системы мониторинга воздушных ЛЭП, обеспечивающие системного оператора подробными сведениями о текущем состоянии воздушных кабельных сетей электроснабжения. Система мониторинга состоит из сети измерительных блоков, связанных через канал связи с оборудованием

на диспетчерском пункте. Измерительные блоки распределены вдоль трассы ЛЭП и монтируются на опорах либо непосредственно на высоковольтных проводах. На рис. 3 показана структура системы мониторинга пропускной способности проводов ЛЭП.

Диспетчерские пункты расположены в узловых точках сетей перераспределения энергии. В настоящее время в них, как правило, используются системы SCADA, обеспечивающие обработку и интерпретацию полученных от измерительных блоков данных (рис. 4). В измерительный блок входят следующие базовые компоненты:

- группа датчиков для измерения основных текущих параметров проводной линии;

- процессорный модуль для обработки измеренных данных;
- система передачи данных;
- модуль автономного питания.

В зависимости от функционального назначения в системах мониторинга могут использоваться различные типы датчиков:

- для измерения тока в проводе;
- температуры провода в полете;
- механического напряжения провода в точках подвеса (тензодатчики);
- для измерения затухания в оптических волокнах грозотроса или фазного провода;
- для измерения критических стрел провеса;
- климатических условий (метеостанция);
- вибрационных характеристик проводов (акселерометры).

Измерение тока осуществляется бесконтактным методом, для чего используются датчики на основе эффекта Холла или катушки Роговского.

Система питания автономных измерительных блоков

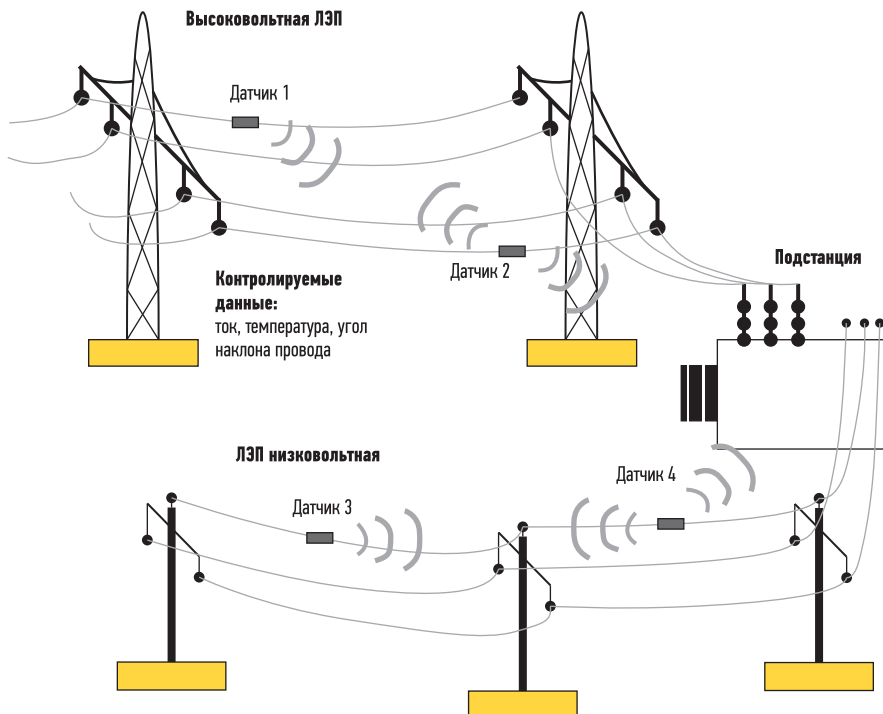
В настоящее время для питания измерительных блоков систем мониторинга воздушных линий (ВЛ) используется два варианта. Для измерительных систем, размещаемых на мачтах опор ЛЭП, как правило, используются аккумуляторные батареи, подзаряжаемые от солнечных батарей. Для измерительных модулей, монтируемых непосредственно на проводах ЛЭП, питание производится от токового трансформатора.

Токовый трансформатор преобразует энергию непосредственно из провода ЛЭП. В качестве источника возбуждения (первичная обмотка трансформатора) используется токнесущий провод ЛЭП. Вторичная обмотка трансформатора — тороидальная катушка с ферромагнитным сердечником. Модуль индукционного источника питания состоит из токового трансформатора, выпрямителя, аккумулятора энергии (ионистора) и преобразователя напряжения, который обеспечивает работу всех цифровых и аналоговых узлов измерителя.

Канал передачи данных

В настоящее время для передачи данных в системах мониторинга

РИС. 4. ▼
Структура измерительного блока и центра мониторинга



ВЛ в основном используются беспроводные каналы связи — это GSM- или же ISM-радиомодемы, работающие на частотах 434, 868 МГц и 2,4 ГГц.

GSM-модемы уже более десяти лет используются на рынке средств АСУ ТП, в том числе и для передачи данных в системах мониторинга. У первых моделей возможности были ограничены передачей SMS-сообщений и данных в аналоговом режиме. Работа таких устройств в режиме аналогового модема обеспечивает скорость передачи данных всего 9,5 кбод, а оплата производится в соответствии со временем нахождения в сети. Система GPRS реализует пакетную коммутацию на всем протяжении канала связи, существенно оптимизируя услуги передачи данных в сетях стандарта GSM. Она практически мгновенно устанавливает соединения, использует сетевые ресурсы и занимает участок диапазона частот только в моменты фактической передачи данных, что гарантирует чрезвычайно эффективное использование доступной полосы частот. GPRS предоставляет услугу многоточечной передачи (мультивещания) между провайдером определенной сети и группой мобильных абонентов с терминалами GPRS. Для GPRS необходима оплата трафика, которая начисляется только за объем переданной и принятой информации, а не за время нахождения модема в состоянии приема/передачи.

Для передачи данных от модулей измерителей в сервер системы мониторинга может быть использована беспроводная сеть, созданная на основе радиомодемов xBee компании Digi. В настоящее время выпускаются трансиверы на частоты 868 МГц и 2,4 ГГц. Трансиверы обеспечивают дальность передачи данных в прямой видимости до 4 км. На базе сети трансиверов ZigBee с топологией backbone можно организовать эстафетную передачу данных по сети между измерителями к серверу данных системы мониторинга. Направление передачи в сети передачи вдоль ЛЭП всегда задано в сторону сервера. Для повышения надежности предусмотрена возможность альтернативного обхода проблемного узла, блокирующего связь по цепочке.

Мониторинг погодных условий вдоль линий электропередачи

На ЛЭП постоянно оказывают воздействие погодные условия. Температура, осадки, атмосферное давление, влажность, а также скорость и направление ветра являются важными параметрами, измерение которых необходимо для мониторинга погодных условий для ЛЭП. Знание текущей погодной ситуации вдоль линии электропередачи позволяет уменьшить количество отключений энергии. Датчики и системы слежения за погодными условиями должны располагаться вдоль ЛЭП. Энергетическим компаниям требуются достоверные метеорологические данные для эффективного управления работой электросетей. Для контроля могут использоваться как полные метеорологические станции, работающие в автономном режиме, так и просто набор дистанционных датчиков, смонтированных на опорах.

Состояние проводов и изоляции ЛЭП

В процессе эксплуатации может происходить повреждение и износ проводов, а также загрязнение и пробой изоляторов. При этом возникают межфазные утечки и замыкания, а также замыкания на землю. Кроме того, за счет старения проводов при нагревании протекающим током может происходить критическое провисание и касание проводов как земли, так и объектов рельефа. Большую часть повреждений воздушных линий составляют короткие замыкания и обрывы проводов. При этом определение места повреждения и восстановление поврежденных участков электролинии сети являются наиболее сложными и длительными операциями. Короткие замыкания и обрывы приводят к значительным потерям электроэнергии.

Пропускная способность ВЛ ограничивается нагревом проводов и устойчивостью электропередачи. Причем с увеличением длины линий второй фактор (устойчивость) определяет предел передаваемой мощности. Провисание провода, характеризующееся стрелой провеса, в полете ЛЭП возникает вследствие удлинения провода при

нагревании и зависит как температуры воздуха, так и от нагревания самого провода вследствие протекания по нему тока.

В проектной документации на ЛЭП указаны допустимые параметры стрелы провеса для каждого пролета трассы. Стрела провеса может определяться как с помощью тензодатчиков, расположенных на опорах в точках подвеса проводов, так и косвенно, по данным датчиков акселерометров измерительных модулей, смонтированных непосредственно на проводе. При этом также учитываются температуры окружающего воздуха и провода и величина тока через провод. Наличие этих данных позволяет определять опасные режимы эксплуатации проводов в пролетах и при необходимости изменять ресурс допустимой токовой нагрузки.

Гололед на проводах ЛЭП

Обледенение также представляет собой угрозу для ЛЭП, а снежный буран может стать тяжелым испытанием для обеспечения работоспособности системы. Гололедно-изморозевые отложения на проводах и тросах ВЛ происходят при температуре воздуха около $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра 5–10 м/с. Гололед обуславливает дополнительные механические нагрузки на все элементы ВЛ. При значительных гололедных отложениях возможны обрывы проводов, тросов, разрушения арматуры, изоляторов и даже опор ВЛ. Гололед является одной из причин «пляски» проводов, способной привести к их схлестыванию. Наличие гололеда можно определить при оценке совокупности данных, полученных от метеодатчиков, тензодатчиков подвеса и акселерометров.

Коронный разряд на проводах

Коронный разряд возникает в резко неоднородных полях, в которых ионизационные процессы могут происходить в узкой области вблизи электродов. К такого рода полям относится и электрическое поле проводов воздушных ЛЭП. Эта высокочастотная составляющая тока короны является источником интенсивного электромагнитного излучения с широким спектром частот, которое создает



РИС. 5. ▲
Модуль питания CAT-1.
Измерительный модуль
CAT-1 монтируется
на опоре

помехи радио- и телевизионному приему. Потери на корону для линий различных напряжений имеют свои значения (для линии ВЛ 500 кВ среднегодовые потери на корону составляют около 9–11 кВт/км). Наличие коронного разряда может определяться посредством спектрального анализа совокупности токовых сигналов, синхронизированных с временными метками GPS.

Влияние гармоник

Одной из основных проблем при транспортировке электроэнергии является влияние высших гармоник напряжения и тока на элементы систем электроснабжения. Несинусоидальные токи в элементах электрической сети вызывают добавочные потери мощности и электроэнергии. Величина этих потерь зависит от степени искажения синусоидальности. Основной вклад в потери вносят 3-я, 5-я и 7-я гармоники.

Величина добавочных потерь в линии определяется такими факторами, как гармоническим составом и величиной токов высших гармоник, их распределением вдоль трассы линии, сопротивлением проводов и тросов. Высокий

уровень добавочных потерь активной мощности и энергии говорит о наличии резонансных процессов в линиях, что приводит к ухудшению качества передаваемой электроэнергии и снижению срока службы электрооборудования сети.

Анализ гармоник тока позволяет выявлять утечки и замыкания, а также локализовать их на уровне сегментов сети. Выявление резонансных явлений в топологии сети позволяет принять меры для лучшего согласования с нагрузкой и уменьшить потери энергии в сетях при транспортировке.

ПРИМЕРЫ КОММЕРЧЕСКИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНЫХ СЕТЕЙ ЛЭП

В настоящее время в нашей стране и за рубежом используется ряд коммерческих систем мониторинга воздушных электросетей, ориентированных на решение определенных задач. Рассмотрим структуры типовых систем мониторинга, которые отличаются не только функциональными характеристиками, но и ценой, а также способом монтажа на ЛЭП.

Система мониторинга проводов ЛЭП CAT-1

Одной из первых коммерческих систем мониторинга стала система CAT-1, разработанная в 1991 г. американской компанией The Valley Group, Inc. В настоящее время во всем мире используется свыше 300 систем мониторинга CAT-1. Система обеспечивает мониторинг в реальном времени погодных условий и натяже-

ния проводов в точках крепления к опорам. Основной модуль системы монтируется на опоре ЛЭП и весит порядка 50 кг. Датчики измерения натяжения проводов представляют собой тензодатчики в корпусе из нержавеющей стали с крепежными отверстиями и устанавливаются между изолятором и опорой. Основой тензодатчиков является измерительный преобразователь. Основной модуль CAT-1 состоит из влагостойкого алюминиевого корпуса с блоком электроники, встроенного модема, антенн для передачи данных и крепежных элементов. Модуль предназначен для эксплуатации в диапазоне температур окружающей среды $-40...+60$ °С. Для обеспечения непрерывной работы модуля используется 12-В аккумуляторная батарея, зарядное устройство и панель солнечной батареи (рис. 5).

Несмотря на простоту измерений, система за счет использования патентованных алгоритмов анализа обеспечивает выявление и расчет многих полезных параметров ВЛ, например стрелы провеса, токовой пропускной способности линии и даже наличия гололеда на проводах. На рис. 6 показана структура системы мониторинга CAT-1 для обнаружения гололеда на проводах.

Бесконтактные измерители тока и температуры провода

В настоящее время получила широкое распространение и другая концепция реализации измерительного модуля для систем мониторинга OTLM (Over head Transmission Line Monitoring), т. е. мониторинг пропускной способности ВЛ. В отличие от системы мониторинга CAT-1, измерительный модуль OTLM конструктивно монтируется на высоковольтный провод. Измерение тока в проводе и питание модуля осуществляется бесконтактно. Питание прибора производится от энергии, получаемой от провода через токовый трансформатор. Система OTLM обеспечивает в реальном времени измерение температуры и тока проводов.

На рис. 7 показан общий вид OTLM-модуля, производимого словенской компанией C&G.

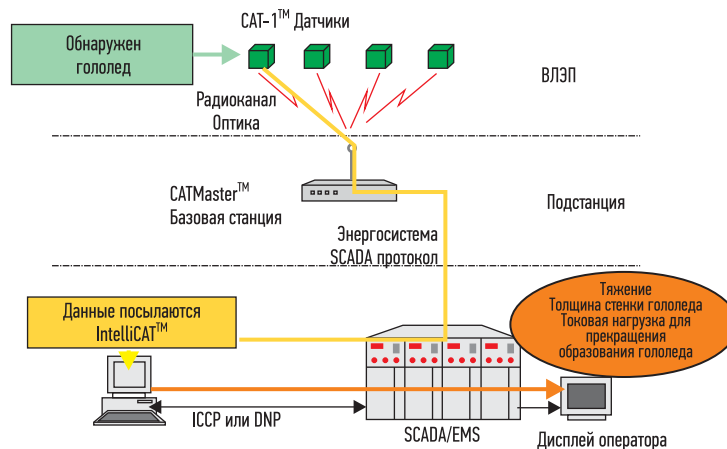


РИС. 6. ▶
Пример использования
системы мониторинга
CAT-1 для обнаружения
гололеда на проводах

Основные характеристики измерительного модуля ОТЛМ:

- диаметр капсулы 305 мм, длина 300 мм;
- вес капсулы 10 кг;
- диапазон применения на линиях ЛЭП — до 420 кВ;
- частота 50 Гц;
- диаметр токонесущего провода 10–50 мм;
- диапазон рабочих токов 50–1100 А;
- диапазон измерения температуры провода –40...+125 °С;
- диапазон рабочих температур –40...+70 °С;
- точность измерения температуры до 1 °С;
- канал передачи данных — GSM (900/1100/1800/1900 МГц);
- протокол передачи SMS/GPRS.

Устройство измеряет ток в проводе и температуру провода в фиксированных точках. Прибор имеет крепление для монтажа непосредственно на провод. Источник питания — встроенный токовый трансформатор. Получаемая энергия используется для питания всего устройства. Никаких внешних источников питания не требуется. Также в приборе используется GPS-приемник. Измеренные значения тока и температуры привязаны, таким образом, к конкретным координатам положения блока на ЛЭП и меткам точного времени. Данные измерений периодически передаются в диспетчерский пункт, оборудованный системой SCADA, через стандартный IEC-протокол. Данные доступны через веб-браузер.

ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЕ ИСТОРИИ АВАРИЙ

Регистрация в ОЗУ с кольцевой записью значений тока в линии с временной привязкой позволяет регистрировать в памяти предаварийную и послеаварийную историю событий в локальной точке установки измерителя на проводе. Осциллограммы, содержащие предысторию и историю аварии длительностью несколько минут, архивируются в ОЗУ большой емкости (FRAM). Эти данные могут быть переданы на сервер диспетчерского пункта или же использованы системой нескольких измерительных модулей для анализа и локализации аварийного события, например

факта короткого замыкания или обрыва провода.

МЕТОДЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ТОКОВ УТЕЧКИ И КЗ В ЛЭП

Линии электрических сетей с большими токами замыкания на землю характеризуются достаточно большой протяженностью. Методы и средства ОМП здесь основаны на измерении и запоминании параметров аварийного режима и вычислении расстояния до мест повреждения. Обработка результатов измерения выполняется уже после отключения линии релейной защитой. Одновременная фиксация аварийного сигнала до отключения источника питания ЛЭП устройствами контроля тока и напряжения в проводе воздушной ЛЭП и совместная обработка результатов измерений предлагаемыми способами позволяет быстро и достаточно просто определить место повреждения. Метод основан на регистрации системой синхронизированных от GPS датчиков тока и напряжения времени прохождения скачка фазного напряжения. Значения временных меток передаются в диспетчерский центр для обработки, где определяется сегмент поврежденной проводной сети. Анализируется аварийный сигнал, в котором выделяют одиннадцатую гармонику. Анализ фазовой характеристики вдоль линии передачи позволяет локализовать место аварии.

ЛАЗЕРНАЯ КАРТОГРАФИЯ ЛЭП

Достигнутые в последние годы технологические успехи в совершенствовании средств авиационного дистанционного зондирования позволяют использовать принципиально новые подходы для топографического мониторинга ЛЭП. С помощью лазерного аэрокартографического сканирования в настоящий момент можно получать точные карты расположения всех объектов ЛЭП, в том числе опор и проводов с привязкой к 3D-рельефу местности. Топология рельефа, положение опор, высот подвеса, положение других значимых объектов в непосредственной близости от ЛЭП — все это теперь доступно оператору

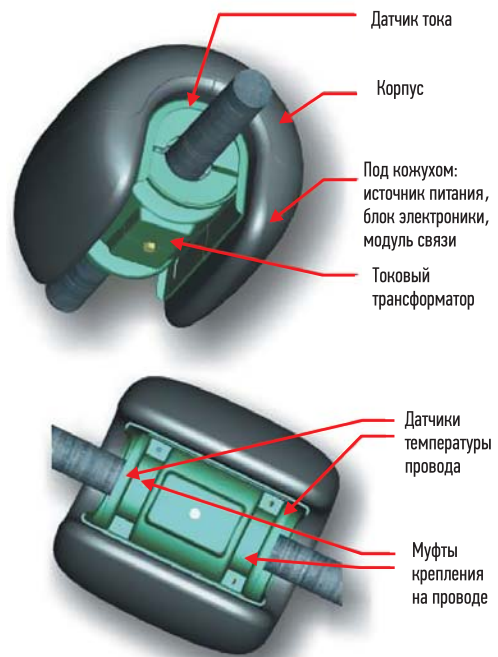


РИС. 7. ▲ Общий вид прибора ОТЛМ

систем SCADA, наряду с оперативной информацией по состоянию проводов и климатических условий. При лазерном сканировании вдоль трассы ЛЭП можно параллельно проводить тепловизионную съемку (рис. 8). Классическими примерами являются обнаружение дефектов изоляции и изменение температуры проводов при съемке ЛЭП и термоконтроль состояния тепловых коммуникаций и ограждающих конструкций зданий на предмет сверхнормативных потерь энергии.

Использование лазерного локалятора позволяет получать трехмерные образы рельефа и всех наземных объектов, а также проводить по ним геометрические измерения (рис. 9).

Совместное использование лазерно-локационной и инфракрасной съемки позволяет одновременно измерять истинную температуру

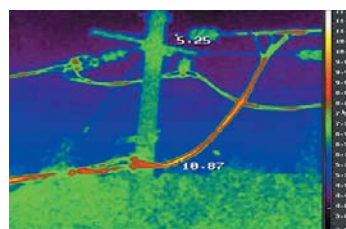
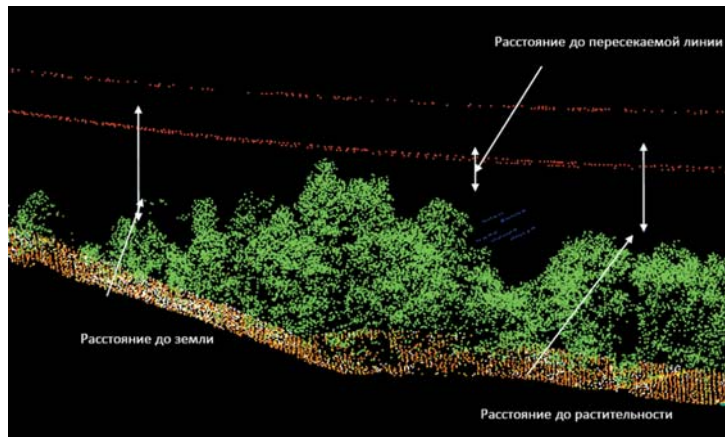


РИС. 8. ◀ Инфракрасное изображение фрагмента ЛЭП, полученное с помощью тепловизора IRTIS, работающего в спектральном диапазоне 3–5 мкм

РИС. 9. ►

Пример представления топологической модели трассы в системе SCADA



провода и стрелу провеса, а также определять места утечек энергии и поврежденные изоляторы.

МОНТАЖ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Эксплуатация электроустановок и электрооборудования электрических сетей без их отключения становится в настоящее время основным способом обслуживания, и она широко применяется в различных странах мира на линиях электропередачи всех классов напряжения — от 0,38 до 750 кВ. Эта технология была разработана в СССР еще в 50-е годы и широко использовалась на практике. Применение этой системы позволяет сохранять нормальный режим работы электрических сетей при выполнении монтажа дополнительного оборудования и регламентных работ. Прогрессивность работ

под напряжением дает экономические преимущества при сохранении безопасности операторов.

Для проведения монтажных работ на ВЛ под напряжением используются гидроподъемники, система изоляции, электропроводящий комплект спецодежды, образующий клетку Фарадея, внутри которой действие поля сведено к минимуму (рис. 10). Вся система гарантирует защиту электромонтера от протекания по нему тока ниже порога чувствительности. Это достигается выравниванием потенциалов рабочего места в системе «провода–подъемник–оператор» и шунтированием с одновременным применением надежной изоляции рабочего места от земли или заземленных элементов опоры. При этом от воздействия электрического поля электромонтер защищается электропроводящим комплектом спецодежды. Для удобства и технологичности монтажа на проводе корпус измерителя, в котором размещаются датчик тока, питающий трансформатор и блок электроники, выполняется из двух половинок. Обе половинки корпуса соединены посредством шарнирного механизма.

Управление шарнирным механизмом при монтаже измерителя тока на проводе ЛЭП производится посредством специальной поворотной штанги с шестигранным ключом. Перед монтажом, поворачивая ключ против часовой стрелки, производится раздвижение секций корпуса. Далее измеритель цепляется на провод ЛЭП. Фиксация корпуса измерителя тока на проводе производится поворотом технологического ключа по часовой стрелке. При этом обе половинки корпуса сходятся, замы-

кая контур вокруг провода. Встроенные муфты обеспечивают жесткую фиксацию корпуса измерителя тока на проводе ЛЭП (рис. 11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потребность в увеличении энергии вынуждает энергосистемы использовать силовые кабели на пределе их физических возможностей, а интересы безопасности и эффективности имеют огромное значение для операторов, которым важно знать, какие процессы происходят вдоль кабельной трассы (локальный нагрев, критическая раскочка проводов, критический провес, обледенение). Системы мониторинга воздушных электросетей ЛЭП обеспечивают дополнительные функции, позволяя повысить эффективность передачи электроэнергии и уменьшить потери. Мониторинг не только обеспечивает повышение надежности транспорта электроэнергии, но и способствует уменьшению расходов на обслуживание линий электропередачи за счет более оперативных и точных данных при локализации аварийных сегментов, а также прогнозирования проблемных ситуаций на трассе. Использование перспективных систем мониторинга воздушных электросетей в последнее время стало особенно актуальным в России, поскольку, во-первых, существенно возросла стоимость ущерба при крупных авариях, а во-вторых — в связи с уменьшением надежности энергосистем вследствие сильного износа как используемого оборудования, так и проводных линий. ●

РИС. 10. ▼

Монтаж измерительного блока на проводах ЛЭП

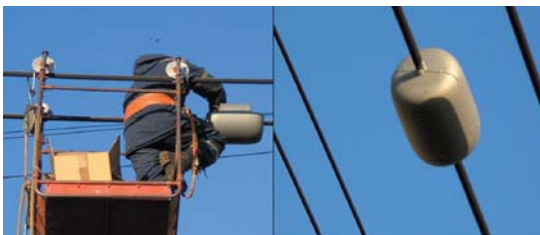


РИС. 11. ►

Монтаж измерителя Donut на проводе ЛЭП

ЛИТЕРАТУРА:

1. Эффективные инженерные решения по повышению пропускной способности ВЛ на основе применения системы мониторинга тока и температуры проводов, математического моделирования поведения элементов линий в различных режимах эксплуатации // Материалы презентации МРСК Ходинг.
2. Костинов И. Система мониторинга CAT-1 — повышение пропускной способности и надежности в ЛЭП // Энергетика. 2011. № 3 (36).
3. Жиленков Н. Новые технологии беспроводной передачи данных // СТА. 2003. № 4.
4. Самарин А. В., Рыгалин Д. Б., Шкляев А. А. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП // Естественные и технические науки. 2012. № 1, 2.
5. Power Donut²™ System for Overhead Transmission Line Monitoring. Product Overview. 2006. USI, Amnork, NY. www.usi-power.com
6. Пат. № 2,724, 821 (США) Remote Measuring System. Nov.22 1955.