

НОВЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

А.С. Тимофеев, студент

М.Д. Макарьев студент

Иркутский национальный исследовательский технический университет
(Россия, г. Иркутск)

DOI:10.24412/2500-1000-2024-1-2-213-223

Аннотация. В статье рассматривается актуальная тема, связанная с мониторингом и диагностикой воздушных линий электропередачи с применением комплексных методов диагностики. Авторами раскрываются текущие проблемы при эксплуатации воздушных линий, описывается комплексная диагностика ВЛ с помощью различных аппаратов и приборов. Особое внимание уделяется перспективным оптическим методам контроля с помощью электронно-оптических дефектоскопов ультрафиолетового диапазона, тепловизоров и камер высокого разрешения. В работе оценивается значимость состояния сетей электроснабжения для передачи электроэнергии с минимальными потерями. Проводится сравнительный анализ существующих устройств мониторинга состояния ВЛ. На основе проделанной работы были выявлены решения в области интернет-вещей, беспилотных систем, строения электропроводов.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, обследование, комплексная диагностика, контроль, качество.

Как известно, получение актуальных пространственных данных о воздушных ЛЭП и об их техническом состоянии, играет огромную роль для электросетевого хозяйства. Целью диагностических работ является, как правило, получение систематизированных и географически привязанных данных, фиксирующих отклонения от требований нормативной и технической документации в эксплуатации оборудования воздушных линий электропередачи (ВЛ), состояние охранных зон. Эта информация может быть использована для объективной оценки технического состояния элементов линий, своевременного выявления различных дефектов и их элементов, нарушений правил эксплуатации, формирования программ ремонта и реконструкции оборудования ВЛ, планирования и контроля выполнения порубочных работ, а также инженерных изысканий для строительства новых и реконструкции существующих линий, кадастровых и землеустроительных работ и многих других задач. Спектр методов, применяемых в настоящее время для диагностики ВЛ и получения пространственных данных, достаточно широк. Это пешие обходы, тра-

диционные наземные геодезические измерения, аэровизуальное и инструментальное обследование с пилотируемых вертолётов, аэрофотосъёмка и воздушное лазерное сканирование с пилотируемых воздушных судов, космическая съёмка.

1. Текущие проблемы при эксплуатации ВЛ

Линии электропередачи не могут быть полностью надёжными, т.к. в процессе длительной эксплуатации состояние проводов ухудшается – теряется их механическая и электрическая прочность. На проводах ВЛ образуются следующие виды дефектов:

- наброс;
- наличие оборванных или перегоревших проволок;
- коррозия проводов и тросов;
- потеря несущей способности проводов и тросов;
- повреждения проводов и тросов у зажимов и дистанционных распорок;
- перегрев провода;
- наличие перегибов провода;
- дефекты сварки;
- отклонение опор относительно оси линии;

- разрушение изоляторов.

2. Комплексная диагностика ВЛ

Комплексная диагностика ВЛ включает следующие основные виды диагностических работ:

- магнитометрический контроль состояния металлических конструкций опор;
- контроль внешней изоляции ВЛ;
- измерение расстояний по вертикали от проводов (грозозащитных тросов) до поверхности земли вдоль трассы ВЛ;
- ультразвуковой контроль анкерных креплений фундаментов;
- сейсмоакустический контроль состояния фундаментов и ж/б конструкций;
- дефектоскопия оттяжек промежуточных опор;
- тепловизионный контроль соединений проводов, арматуры и изоляции ВЛ;
- мониторинг температуры проводов для ВЛ, оснащенных установками плавки гололеда и при наличии специальных обоснований для ВЛ, которые систематически работают с нагрузкой близкой к длительно допустимой;
- контроль проявлений высоковольтного пробоя;
- измерение сопротивления контура заземления.

3. Контроль качества заземления опор ВЛ

Основным критерием качества заземления является измерение сопротивления контура заземления. Целью проведения

измерений является проверка соответствия заземляющего устройства требованиям нормативных документов (ПУЭ гл. 1.8; ПТЭЭП пр.3; 3.1). Объектами испытаний и измерений являются: заземляющие устройства (заземлители в случае применения одиночных электродов) и грунт в районе установки заземляющих устройств. Как правило в качестве средства измерений используется измеритель сопротивления заземления Ф4103-М1. При испытаниях заземляющих устройств ВЛ проводится выборочная проверка со вскрытием грунта производится не менее чем у 2% опор от общего числа опор с заземлителями. Проверку следует производить в населенной местности, на участках с наиболее агрессивными выдуваемыми и плохопроводящими грунтами. Проверка заземляющих устройств ВЛ производится после ремонтов, но не реже 1 раза в 6 лет для ВЛ напряжением до 1000 В на опорах с разрядниками и другим электрооборудованием и выборочно у 2% металлических и железобетонных опор на участках в населенной местности. Измерения производятся также после реконструкции и ремонта заземляющих устройств, а также при обнаружении разрушения или следов перекрытия изоляторов электрической дугой.

Принцип действия прибора Ф-4301-М1 основан на компенсационном методе измерения. Структурная схема прибора приведена на рисунке 1.

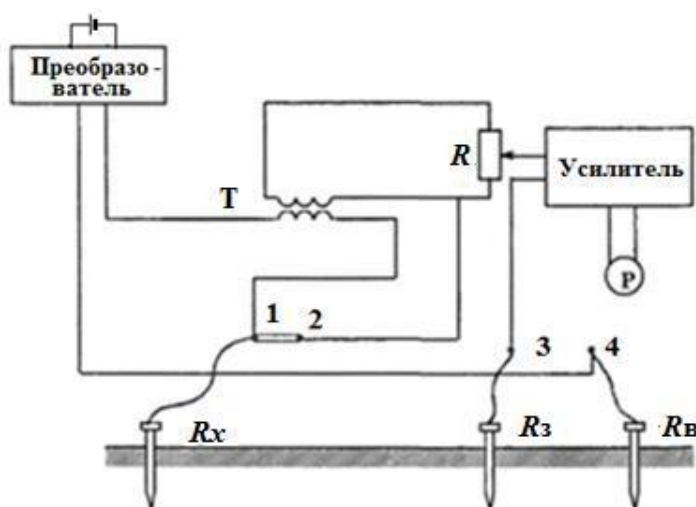


Рис. 1. Структурная схема прибора Ф-4301-М1

4. Магнитометрический контроль состояния металлических конструкций опор и телеметрический контроль параметров проводов ЛЭП

Бесконтактный магнитометрический метод основан на регистрации и анализе аномалий напряженности магнитного поля, возникающих в зонах концентрации продольных и поперечных напряжений, в зонах пластической деформации, изменения структуры металла на участках предразрушения и разрушения металла.

Целью метода является обнаружение, определение координат и слежение (мониторинг) за аномалиями магнитного поля, связанными с дефектами основного металла, металла сварных соединений, а также общего напряженного состояния металлических конструкций опор. Положение и ориентация не влияет на выявляемость дефектов. Метод обеспечивает обнаружение и регистрацию дефектных участков и позволяет классифицировать зарождающиеся и развивающиеся дефекты по степени опасности.

Метод может быть использован для контроля металлических конструкций опор при их сооружении, периодических

технических освидетельствованиях (мониторинге), для оптимизации объемов при капитальном ремонте.

Для проведения бесконтактного магнитометрического обследования рекомендуются приборы СКИФ серии «МБС» НТЦ «Траснкор-К», г. Москва или магнитометры других производителей, обеспечивающие получение информации о местоположении аномалий магнитного поля, сопряженных с дефектами металла.

5. Система «смарт-провод»

Российские ученые разработали «Смарт-провод» — комплексную систему мониторинга воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), которая показана на рис.2. С помощью специального программного обеспечения она в режиме реального времени считывает и анализирует параметры состояния пролета ВЛЭП. Устройство работает на электроэнергии провода высоковольтной линии и не требует дополнительного источника питания. Работа выполнена сотрудниками подведомственного Минобрнауки России Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).



Рис. 2. Система «Смарт-провод»

По словам авторов, «Смарт-провод» умеет контролировать и оперативно передавать на диспетчерский пульт информацию о местах обрыва или короткого замыкания, в том числе однофазного. Также система информирует о состоянии высоковольтных воздушных линий в каждом пролете и на каждой фазе, определяет величину раскачивания проводов, находит пролеты с налипанием снега и гололеда,

выявляет места механического воздействия на провода, измеряет температуру окружающей среды и т.д.

Система представляет собой капсулу с датчиками, которую монтируют прямо на провод (рис. 3), и она в режиме реального времени считывает и анализирует параметры состояния пролета ВЛЭП с помощью специально созданного программного обеспечения.



Рис. 3. Капсула с датчиками

Передача данных между датчиками и сервером происходит по беспроводной связи. Система позволяет предотвратить аварии на воздушных линиях электропередачи, сокращает издержки на их содержание и повышает экономическую эффективность.

6. Мониторинг ЛЭП по оптическому волокну в грозозащитном тросе или фазном проводе

Оптическое волокно может использоваться не только как линия передачи данных, но и как протяженный чувствительный элемент, способный детектировать изменения различных величин.

Для этого применяются специальные устройства с лазерным источником, которые посылают импульсы в оптическое волокно и на основе анализа обратного рассеивания позволяют определить величину воздействий вдоль всей линии.

Типы приборов для мониторинга:

- DTS (Distributed Temperature Sensing) – система распределенного мониторинга температуры.

Принцип действия основан на рассеянии Рамана и изменении его величины при изменении температуры. Блок обработки получает данные о величине рассеяния по

длине оптического волокна. При этом сама волоконно-оптическая линия представляет собой по сути тысячи точечных датчиков, что является неоспоримым преимуществом таких систем. Быстродействие и точность измерений находятся в обратной зависимости, т.е. чем точнее необходимо измерять температуру, тем больше времени требуется и наоборот, если достаточно погрешности в несколько градусов, то быстродействие увеличивается.

Оптическое волокно на линиях электропередач может присутствовать в виде различных оптических кабелей:

- ОКСН – самонесущий оптический кабель (рис. 4). Не является основным элементом на высоковольтной линии. Служит для организации канала волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). Подвес ОКСН приводит к дополнительным нагрузкам на опоры, кроме того, его применение ограничено на линиях 110 кВ и выше ввиду возможного образования трекинговых разрядов на поверхности оболочки кабеля, которые приводят к ее деградации. Статистические данные ПАО «Ростелеком» показывают, что ОКСН наиболее часто выходит из строя в сравнении с другими типами кабелей;



Рис. 4. Поперечное сечение ОКСН

- ОКГТ – оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос (рис. 5). Сам грозозащитный трос является основным элементом ВЛ напряжением от 35 кВ и по сути является продуктом «2 в 1»: предотвращает удары молнии в провода и одновременно является каналом связи. Не создает дополнительные нагрузки на опоры, исключает дополнительные затраты на монтаж и обслуживание. Будучи подве-

шенным в самой высокой точке, является наиболее надежным решением, согласно статистике ПАО «Ростелеком». Срок службы в два раза выше, чем у ОКСН (50 лет). В связи с тем, что в 2018 году произошел резкий рост цен на арамид, используемый в ОКСН, применение ОКГТ на ВЛ стало еще более экономически целесообразным;

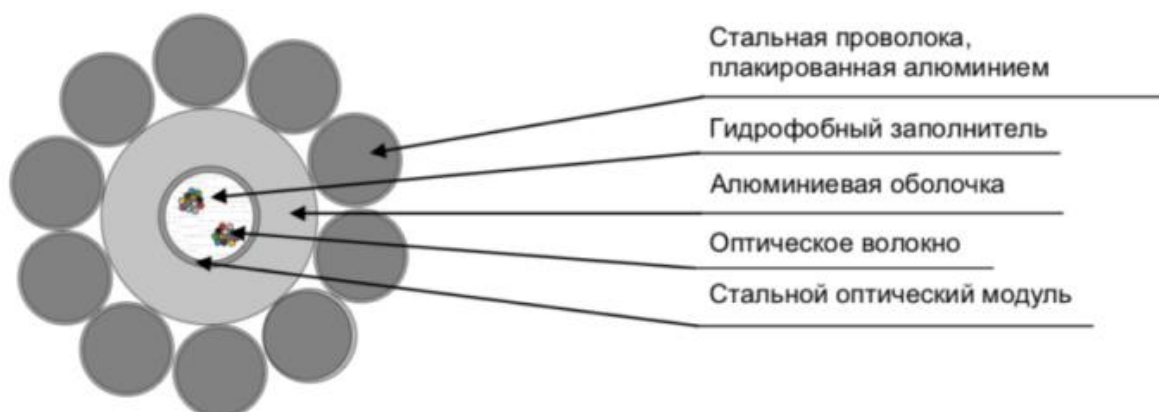


Рис. 5. Поперечное сечение ОКГТ

- ОКФП – оптический кабель, встроенный в фазный провод (рис. 6). Фазные провода также являются основным элементом ВЛ, но ОКФП в настоящее время находит ограниченное применение. ОКФП используется как резервный канал связи там, где уже используется ОКГТ или ОКСН, а также на больших спец-

переходах, где применение ОКСН или ОКГТ физически невозможно. Основными сдерживающими факторами применения ОКФП являются отсутствие нормативной документации и соответствующего опыта при проектировании, монтаже и эксплуатации. Однако, например, в энергетике Китая ОКФП применяется намного шире.

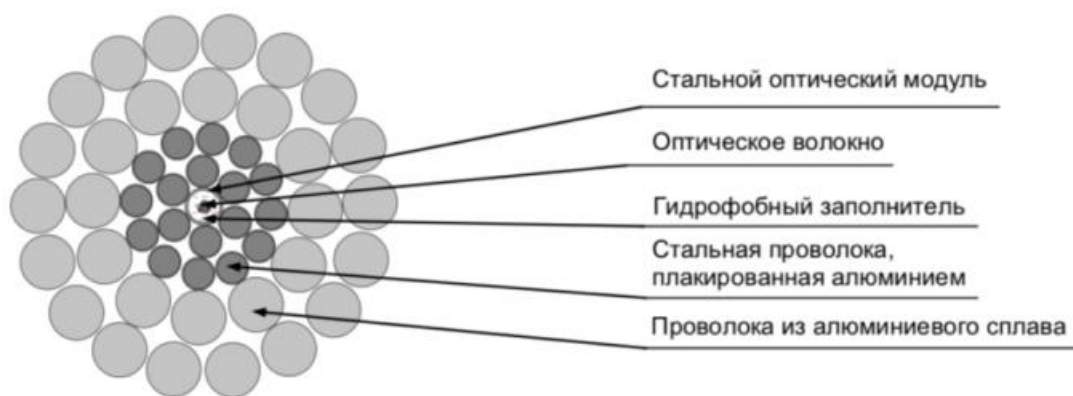


Рис. 6. Поперечное сечение ОКФП

На основе различных типов систем мониторинга и оптических кабелей, которые могут выступать в качестве распределен-

ных датчиков, рассмотрим возможные варианты их применения на высоковольтных линиях (рис. 7).

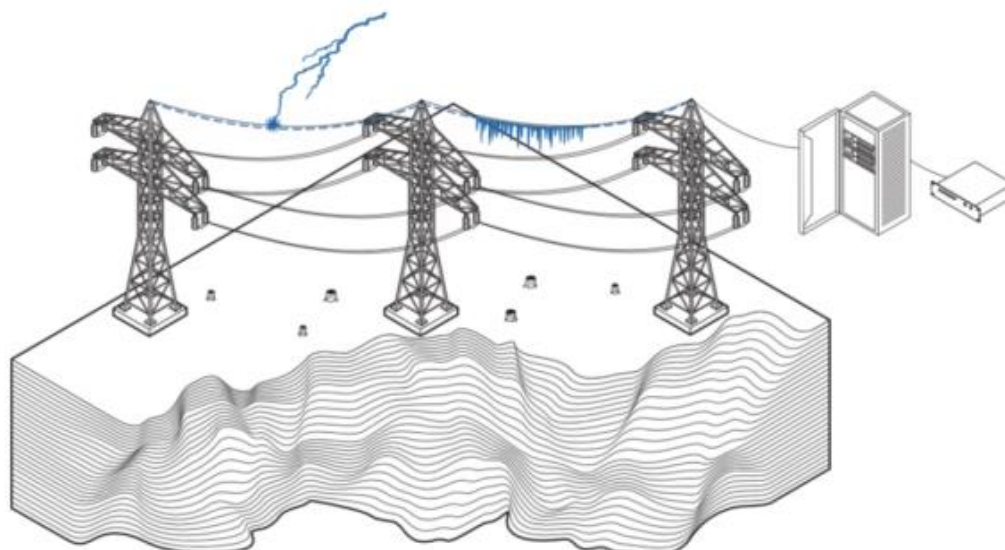


Рис. 7. Условное изображение распределенных систем мониторинга ВЛ

Возможно создание двух типов систем мониторинга линий электропередачи:

- предупредительные (П). Система предупреждает о возможности возникновения аварийной ситуации, тем самым давая возможность оперативно реагировать и предпринимать необходимые меры для ее предотвращения;

- обслуживающие (О). Система локализует место возникновения аварийной ситуации, тем самым снижая временные и материальные затраты на обнаружение повреждений.

Цель контроля температуры при плавке гололеда на грозозащитном тресе состоит в том, чтобы не допускать перегрев оптического волокна. Для этого система свое-

временно отключает ток плавки. Данные системы представлены на рынке в промышленном исполнении и эксплуатируются.

Контроль температуры фазного провода актуален на ВЛ, где зачастую необходимо увеличивать передаваемую мощность и токовую нагрузку для потребителей. При заданных климатических условиях возможно эффективное использование всех ресурсов ВЛ, не допуская при этом возникновения аварийных ситуаций и соблюдая требуемые габариты проводов до пересечений (ВЛ, ж/д, автомагистрали). Системы контроля температуры и токовых нагрузок силовых кабелей широко распространены и применяются повсеместно.

Для этого в броню силового кабеля вместо одной из проволок помещается стальной оптический модуль с волокном, по которому производится мониторинг. Аналогично данную систему можно применять и для воздушных ВЛ и фазных проводов, где, как показано на рисунке 3, стальной модуль с волокном также заменяет собой одну из проволок. При этом механические и электрические характеристики ОКФП практически соответствуют характеристикам фазного провода без оптического волокна.

Контроль состояния изоляторов на ВЛ возможен при помощи оптического волокна, встроенного как в грозозащитный трос, так и в фазный провод. При этом используется система акустического мониторинга, когда волокно, как распределенный виртуальный микрофон, «слышит» характерный треск неисправных изоляторов, требующих замены. Возможность создания подобных систем исследована теоретически и нуждается в экспериментальной проверке. В связи с этим, в настоящее время прорабатывается вопрос проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по данной тематике.

Обнаружение места удара молнии и коротких замыканий на ВЛ особенно актуально для эксплуатирующихся подразделений. Каждое аварийное событие требует визуального осмотра места возможного повреждения. Имеющиеся средства диагностики не позволяют с достаточной степенью точности локализовать событие на ВЛ. В связи с этим, аварийно-восстановительные бригады тратят большое количество времени на обследование ВЛ. Зачастую доступ к линии затруднен болотами, лесами и не всегда удается быстро обнаружить, в какое место грозозащитного троса произошел удар молнии или где произошло короткое замыкание.

Системы акустического мониторинга по ОКГТ позволяют по характерным звуковым событиям достоверно локализовать место удара молнии или возникновения КЗ, вплоть до нескольких метров. Благодаря этому значительно сокращается время работы бригад, позволяя быстро и опе-

ративно восстанавливать работоспособность линий. В настоящее время запланировано проведение экспериментальных испытаний, которые позволят откалибровать и настроить системы на максимально эффективную работу.

Обнаружение активности вблизи ВЛ актуально для предотвращения несанкционированных работ в охранной зоне. Система акустического мониторинга может работать как по ОКГТ, так и по ОКФП, «слыша» подъезд техники, воздействие на опоры, выстрелы из ружья и т.п. события. Благодаря этому возможен оперативный выезд бригады для предотвращения аварийной ситуации на ВЛ. В настоящее время система также находится в состоянии экспериментального тестирования.

Контроль начала гололедообразования возможен с помощью систем распределенного мониторинга напряженного состояния волокна. Для этого в ОКГТ или ОКФП одно из волокон помещают в преднатянутом состоянии. В то время как волокна, предназначенные для связи, укладываются в стальной модуль с небольшой избыточной длиной. Делается это для того, чтобы при возникновении нагрузок на грозотрос или фазный провод в результате воздействия льда или ветра, волокно не подвергалось удлинению. Преднатянутое волокно при любом изменении нагрузки сразу же начинает удлиняться, что своевременно фиксирует система. Таким образом, даже небольшое удлинение ОКГТ или ОКФП при гололедообразовании регистрируется и предпринимаются дальнейшие превентивные меры, например плавка гололеда.

7. Возможности применения беспилотных авиационных систем (бас) для мониторинга воздушных ЛЭП

Мониторинг воздушных линий электропередачи (ЛЭП) при помощи беспилотных авиационных систем (БАС) достаточно новое, но перспективное направление. На участках линий электропередачи, находящихся в труднодоступных местах, обследование наземными методами может затянуться на несколько дней или даже недель, а с помощью БАС – займет несколько часов.

Перечислим основные виды работ, для которых возможно применение беспилотных систем:

- плановая диагностика – облет, наблюдение и фотографирование ЛЭП на малых и средних высотах, инспекция состояния ЛЭП и их охранных зон, выявление дефектов и нарушений, определение пространственных нарушений (в плане и по высоте) габаритов просеки и проводов;

- аварийно-восстановительные работы – облет ЛЭП на средних высотах при различных метеоусловиях, с использованием фотовспышки или тепловизора в ночное время;

- топографо-геодезические работы – создание цифровых топографических и ка-

дастровых планов, трехмерных моделей местности и линий электропередачи, сопровождение работ по строительству и реконструкции ЛЭП.

Мониторинг ЛЭП с помощью БАС является безопасным, так как полет осуществляется на малых высотах и без экипажа на борту. Кроме того, существует еще ряд преимуществ: возможность съемки в сложных метеоусловиях и получение полной и документированной информации, т.е. ЛЭП обследуется на всей протяженности, съемка осуществляется с разных ракурсов (рис. 8), а полученные снимки имеют высокое разрешение.

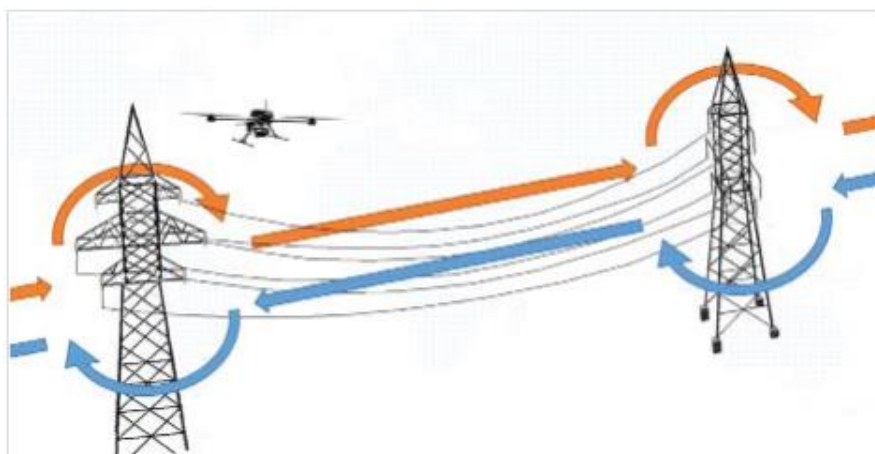


Рис.8. Схема мониторинга ЛЭП с помощью БАС мультироторного типа

По результатам аэрофотосъемочных работ воздушных линий электропередачи с помощью БАС можно получить снимки высокого разрешения, на которых хорошо

различимы опоры, провода, изоляторы, состояние растительности и подстилающей поверхности в охранной зоне трассы ЛЭП (рис. 9 и 10).



Рис. 9. Изолятор опоры ЛЭП на снимке, полученном с помощью БАС



Рис. 10. Упавшая опора на снимке с разрешением пикселя на местности 0,7 см, полученном с помощью БАС

Цифровые снимки, полученные с помощью БАС, позволяют проанализировать достаточно большое число дефектов, таких как:

- дефекты опор – отсутствие, отрыв, деформация элементов металлических опор;
- разрушение верхнего слоя и деформация железобетонных опор; отклонение опор от вертикали;
- разворот, деформация траверсов на железобетонных опорах; отсутствие натя-

жения внутренних стержней и тросовых растяжек; падение, повреждение опор;

- дефекты проводов, линейной и цепной арматуры, разрушение элементов стеклянных и фарфоровых изоляторов;

- отсутствие гасителей вибрации, отсутствие грузов, потеря работоспособности несущего тросика, смещение виброгасителей вдоль проводов относительно проектного положения;

- отсутствие и неправильное расположение соединителей проводов;
- изломы, отрывы лучей дистанционных распорок между проводами расщепленной фазы; обрыв проводов.
- дефекты на трассе – наличие опасной для эксплуатации воздушных ЛЭП растительности;
- наличие древесно-кустарниковой растительности в охранной зоне;
- наличие строений и прочих объектов в охранной зоне;
- пересечение с природными и антропогенными объектами; опасные явления (проседание грунта, подтопление и др.).

Для повышения качества и надежности определения дефектов воздушных линий

электропередачи при их обследовании с помощью БАС в качестве полезной нагрузки кроме цифровых камер, работающих в оптическом диапазоне, могут быть использованы и другие типы измерительной аппаратуры, позволяющие получать видеоизображения в режиме реального времени, снимки в инфракрасном (ИК) и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах, либо облака точек лазерных отражений.

При ИК съемке ЛЭП тепловизором получаемые изображения обладают хорошей чувствительностью (0,1-0,3 К), но невысоким разрешением (640x480 пикселей) (рис. 11).

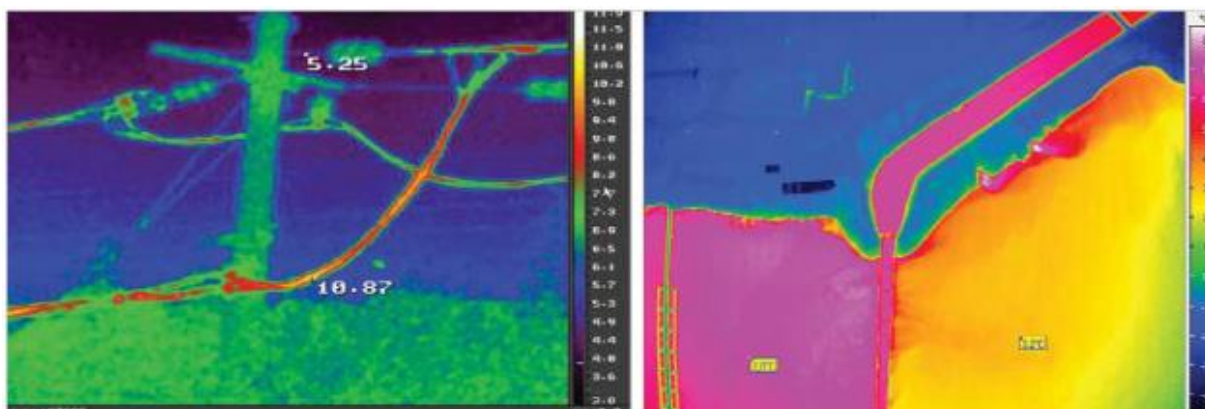


Рис. 11. Пример изображения, полученного при ИК съемке тепловизором: с земли (слева), с БАС Птеро G0 (справа)

Поэтому по изображениям, полученным при высоте полета 200 м с помощью тепловизора, установленного на БАС самолета типа, можно выявлять такие нарушения, как подтопление в охранных зонах, разрушение опор, нагрев значительной площади (около 1 м²), на пример, перегрев крупных трансформаторов, пожары. Для обнаружения нарушений на площади менее 1 м² разрешения этих изображений будет недостаточно. Съемка элементов ЛЭП при помощи тепловизора, установленного на БАС мультироторного типа, оптимальна, если ее невозможно выполнить наземными методами.

Заключение

В заключение следует отметить, что мониторинг не только обеспечивает по-

вышение 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.

Библиографический список

1. Арбузов Р.С. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи / Р.С. Арбузов, А.Г. Овсянников. – Новосибирск: Наука, 2009. – 135 с.
2. Байков И. Применение дистанционных методов при обследовании воздушных линий электропередачи // И. Байков, П. Голубев, Ю. Сизых // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. – 2016. – № 1.
3. Валиев А.В. Опыт применения БЛА «Птеро-Е» для поиска мест аварии на ЛЭП / А.В. Валиев // Кабель-news. – 2009. – № 11. – С. 20-22.
4. Курьянов В.Н. Инновационные высокоэффективные провода для линий электропередачи / В.Н. Курьянов, М.М. Султанов, В.А. Фокин // Энергия единой сети. – 2016. – № 4 (27). – С. 72-73.
5. Статья: Электрические, магнитные, радиоэлектронные измерения. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pp-srv.ru/article/a-2777.html>.

NEW SYSTEMS FOR MONITORING AND DIAGNOSING THE CONDITION OF OVERHEAD LINES

A.S. Timofeev, *Student*

M.D. Makartsov, *Student*

Irkutsk National Research Technical University

(Russia, Irkutsk)

Abstract. *The article deals with an urgent topic related to the monitoring and diagnosis of overhead power lines using complex diagnostic methods. The authors reveal the current problems in the operation of overhead lines, describe the complex diagnostics of overhead lines using various devices and devices. Special attention is paid to promising optical control methods using electron-optical ultraviolet flaw detectors, thermal imagers and high-resolution cameras. The paper evaluates the importance of the state of power supply networks for the transmission of electricity with minimal losses. A comparative analysis of existing overhead line monitoring devices is carried out. Based on the work done, solutions in the field of Internet of Things, unmanned systems, and the structure of electrical wires were identified.*

Keywords: *overhead power lines, inspection, comprehensive diagnostics, control, quality.*