

О выборе беспилотных авиационных систем для аэродиагностики воздушных ЛЭП



В данной статье рассмотрены особенности применения беспилотных авиационных систем различных типов для решения задач аэродиагностики воздушных линий электропередачи.

ГРЯДУНОВ Д.А. , БАРКОВ Р.Р. ,
ООО «ПТЕРО»

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 порученных 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, традиционные наземные геодезические измерения, аэровизуальное и инструментальное обследование с пилотируемых вертолётов, аэрофотосъёмка и воздушное лазерное сканирование с пилотируемых воздушных судов, космическая съёмка. Данные методы рассмотрены во многих публикациях [1, 2]. Аэродиагностика с применением беспилотных

воздушных судов (БВС) также довольно давно применяется в электроэнергетике [3], и с каждым годом масштабы её использования возрастают. В то же время эффективность применения беспилотных авиационных систем (БАС) до настоящего времени скептически оценивается многими профильными специалистами.

Этому есть несколько причин технического и организационного характера. Организационный аспект в большей степени связан с необходимостью заблаговременного получения разрешений на использование воздушного пространства при проведении работ¹ (при аварийно-восстановительных работах и в случае чрезвычайных ситуаций оперативное получение разрешений возможно). Действительно, данное требование в ряде случаев снижает оперативность и экономическую эффективность выполнения работ, порождает возникновение конфликтов интересов пользователей воздушного пространства. Тем не менее, практика показывает, что это всё же является преодолемым препятствием, и при должном уровне планирования в большинстве случаев возможно выполнение намеченных работ в срок. Технической проблемой является невозможность одновременного полёта в несегрегированном воз-

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 11.03.2010 № 138 «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации» (ред. от 14.02.2017) // Собрание законодательства Российской Федерации от 2010 г. , № 14 , ст. 1649.

душном пространстве пилотируемых и беспилотных воздушных судов из-за отсутствия технического решения, утверждённого законодательно. Сейчас на разных уровнях ведётся активная работа по интеграции БВС в несегрегированное воздушное пространство. Среди рассматриваемых мер — установка на БВС систем автоматического зависящего наблюдения радиовещательного типа, выделение воздушного пространства до 150 м над поверхностью земли для полётов в пределах прямой видимости без уведомления диспетчера, за исключением ограничений, установленных структурой воздушного пространства, ниже которой перемещение БВС может осуществляться без согласования с центрами единой системы организации воздушного движения.

Большой проблемой является неверное понимание конечными пользователями технических возможностей беспилотных систем. Присутствуют как неоправданное завышение возможностей, так и их занижение. Кроме того, БАС рассматриваются как самостоятельное средство для решения задач, считаются достаточно простыми в эксплуатации, не требующими структурных и организационных изменений предприятия. В случае использования, например, определённых типов мультикоптеров для верхового осмотра это действительно так.

На самом деле, практически любая беспилотная авиационная система — это лишь носитель полезных нагрузок. Но БАС, оснащённая аэросъёмочным оборудованием — это уже серьёзный инструмент в руках специалиста, решающего прикладные задачи. Наибольшую эффективность данные аэродиagnостики приобретают, будучи представленными в геоинформационных системах и системах управления предприятием. А практически ценный результат даёт технология, которая включает в себя непосредственно технические средства (БАС, оснащённую определённым аэросъёмочным оборудованием), методику выполнения работ, программно-аппаратные средства обработки, хранения и представления данных, метрологическое обеспечение, нормативную базу.

В случае регулярного использования БАС для более широкого круга задач потребуется не только оснащение эксплуатирующего подразделения, обучение специалистов, но организация производственных процессов обработки и анализа пространственных данных для решения задач предприятия. Решением является заказ услуг, когда предприятие, эксплуатирующее ВЛ, получает готовый аналитический материал по результатам аэродиagnостики, выполняемой внешней организацией.

В то же время необходимо понимать, что как любое техническое решение, беспилотные технологии

имеют определённые границы применимости, в пределах которых их использование целесообразно и эффективно. Тем важнее становится обоснованный подход к выбору соответствующего инструмента, являющегося одним из ключевых элементов успешного решения поставленных задач.

Основываясь на многолетнем опыте специалистов компании «ПТЕРО» в области разработки и производства БАС, а также выполнения производственных и научно-исследовательских работ, в данной статье представлен анализ подходов к выбору технических средств в зависимости от решаемых задач.

ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ БАС

Основной любой БАС является БВС с установленными на него полезными нагрузками. Технические характеристики выбранного типа БВС и установленного на него аэросъёмочного оборудования определяют перечень решаемых в области электроэнергетики задач:

- аэродиagnостика объектов электросетевого хозяйства — воздушных линий электропередачи всех типов, трансформаторных и иных подстанций, распределительных пунктов и других объектов;
- воздушное обследование инженерных сооружений — дымовых труб, градирен, технологических корпусов электростанций, плотин гидроэлектростанций, ветроэлектрических установок;
- мониторинг водохранилищ гидроэлектростанций;
- тепловизионное обследование электростанций и прудов-охладителей;
- оперативный учёт объёмов на открытых угольных складах электростанций и многие другие, в том числе нестандартные применения.

В данной статье подробно рассмотрено использование беспилотной авиационной техники для аэродиagnостики технического состояния ВЛ и её элементов в ходе периодических и внеочередных осмотров, ремонтных и аварийно-восстановительных работ. Кроме того, рассмотрено применение БАС для мониторинга состояния ВЛ во время чрезвычайных ситуаций (ЧС) и для решения охранных задач.

Аэродиagnостика нацелена на решение следующих задач:

- определение технического состояния ВЛ, выявление дефектов (рис. 1);
- выявление нарушений правил и норм эксплуатации ВЛ;
- выявление нарушений в охранных зонах (рис. 2).



Рис. 1. Выявление повреждения изоляторов



Рис. 2. Нарушение охранной зоны ВЛ (увеличенный фрагмент перспективного снимка, БАС «Птеро»)



Рис. 3. Контроль выполнения работ по замене опор ВЛ

Аэродиagnostика выполняется при помощи фото и видеосъёмки в видимом, инфракрасном, ультрафиолетовом (УФ) диапазонах спектра, а также методом воздушного лазерного сканирования.

Аэросъёмка для инженерных изысканий — это, прежде всего, надирная аэрофотосъёмка в видимом

диапазоне спектра и воздушное лазерное сканирование. Основная цель таких работ — получение измерительной картографической информации (ортофотопланов (ОФП), цифровых моделей местности (ЦММ) и цифровых моделей рельефа (ЦМР), соответствующих по точности масштабному ряду 1:500 — 1:10000, различной производной продукции) для задач проектирования, строительства, реконструкции ВЛ, контроля выполнения работ (рис. 3). Картографическая информация может быть также использована и для ряда задач по диагностике ВЛ.

Использование беспилотной авиационной техники для мониторинга ВЛ во время ЧС и для решения охранных задач в первую очередь связано с обеспечением энергетической безопасности критически важных объектов в части предотвращения повреждения ВЛ вследствие воздействия различных внешних факторов. Здесь интерес представляет видеосъёмка в видимом и инфракрасном диапазонах спектра с возможностью передачи видеосигнала в режиме реального времени на наземный пункт управления с целью оперативного принятия решений.

КРИТЕРИИ ВЫБОРА И КЛАССИФИКАЦИЯ БАС

Согласно действующему Воздушному кодексу Российской Федерации (ВК РФ) № 60-ФЗ от 19.03.1997 г. в редакции от 29.07.2017 г., БВС с максимальной взлётной массой до 30 килограммов включительно не подлежат государственной регистрации² и сертификации. Данные положения определяют массовое развитие этого сегмента рынка, упрощая деятельность как разработчиков и производителей беспилотных авиационных систем, так и эксплуатантов. И именно эти БВС целесообразно использовать для рассматриваемых задач.

На данный момент на рынке представлены в основном системы с БВС самолётного и мультироторного (далее — мультикоптеры) типов. Что касается БВС классической вертолётной компоновки, то на рынке беспилотной авиационной техники в настоящий момент представлено крайне мало серийно выпускаемых моделей. Объясняется это достаточно

² Необходимо учитывать, что согласно ВК РФ, беспилотные гражданские воздушные суда с максимальной взлётной массой от 0,25 килограмма до 30 килограммов, ввезённые в Российскую Федерацию или произведённые в Российской Федерации, подлежат учёту в порядке, установленном Правительством Российской Федерации. В то же время порядок учёта до настоящего момента не определён.

высокой конструктивной сложностью вертолётов, включая реализацию автоматического управления. Поэтому их надёжность, удобство и эффективность применения пока вызывают обоснованное сомнение. Использование же систем, где в качестве носителя полезных нагрузок используются другие типы БВС, для решения прикладных задач в электроэнергетике является технически и экономически нецелесообразным.

Выбор конкретного типа и модели БАС определяется следующими параметрами:

- задачи, которые необходимо решить (включая требования к полезной нагрузке и точности выходной продукции);
- необходимая производительность;
- уровень квалификации специалистов, которые будут осуществлять эксплуатацию БАС;
- условия проведения работ (географические, климатические, метеорологические, с точки зрения транспортной доступности объектов и т.д.).

Общие преимущества методов аэродиagnostики с помощью БАС:

- безопасность для специалистов, выполняющих аэродиagnostику. Полёт происходит без человека на борту. Кроме того, специалисту нет необходимости находиться непосредственно на трассе прохождения ВЛ (особенно в случае возникновения чрезвычайных ситуаций, а также с точки зрения электробезопасности);
- обследование происходит без отключения ВЛ;
- возможность получения данных съёмки сверхвысокого пространственного разрешения на уровне нескольких миллиметров на пиксель для видимого диапазона;
- возможность выполнения повторных полётов по заранее подготовленной программе с точным выдерживанием траектории полёта;
- меньшая зависимость от погодных условий, времени суток по сравнению с пилотируемой авиацией.

Далее приведём условную классификацию рассматриваемых БВС и рассмотрим их ключевые преимущества. По продолжительности полёта мультикоптеры можно разделить на три категории:

- до 30 минут;
- от 30 минут до 1 часа;
- свыше 1 часа.

Продолжительность полёта в качестве основы для классификации использована в связи со спецификой задач, на которые ориентировано применение мультикоптеров: облёт и съёмка объектов с разных ракурсов, продолжительное висение в заданной точке и т.д. В случае применения на линейных объектах протяжённость обследуемого участка зависит от

скорости полёта конкретной модели мультикоптера и выбранной схемы обследования.

Первая категория — это массово выпускаемые доступные мультикоптеры, ориентированные на широкий круг потребителей. Представляют собой законченное решение, не позволяющее выполнить его адаптацию под конкретные задачи. Позиционируются как летающие видеокамеры. Как правило, используется либо несменная полезная нагрузка (только цифровая видеокамера с разрешением Full HD и выше), либо выбор полезных нагрузок, предлагаемых производителем, ограничен. Ярким примером является продукция китайской компании DJI (серии Spark, Mavic, Phantom 4/4 Pro, Inspire). Преимуществом является доступность и простота в эксплуатации.

Вторая категория включает профессиональные (специализированные) решения, ориентированные на так называемое промышленное применение. К этой категории относятся, например, следующие БВС: платформы серии Matrice той же компании DJI, квадрокоптер «Геоскан 401» (группа компаний «Геоскан», Россия), октокоптер Supercam X8M (группа компаний «Беспилотные системы», Россия), гексакоптер ZALA 421-21 (группа компаний ZALA AERO, Россия), квадрокоптеры md4-1000 и md4-3000 (Microdrones GmbH, Германия), гексакоптер Aibot A6 (Aibotix GmbH, Германия). Возможна установка различного аэросъёмочного оборудования и спутникового навигационного оборудования геодезического класса. Ряд моделей позволяет выполнить установку нестандартного оборудования.

К третьей категории относятся перспективные системы, использующие в т.ч. альтернативные источники энергии. Одним из таких решений является разработка «Гиперкоптер D-830» (ООО «Гиперкоптер», группа компаний «Инэнерджи»), представляющая собой тяжёлый мультикоптер с водородными топливными элементами, обеспечивающими до 3 часов полёта (рис. 4). Именно развитие этого направления позволит расширить сферу применения мультикоптеров в решении задач обследования протяжённых объектов. Здесь также возможна установка разнообразного аэросъёмочного оборудования.

Ключевые особенности мультикоптеров при обследовании ВЛ:

- возможность облёта элементов ВЛ в ручном режиме и высокодетальной съёмки объектов заинтересованности с передачей видеосигнала в реальном времени;
- выполнение полёта на малых скоростях и в режиме висения, что имеет значение при использовании определённых типов аэросъёмочного оборудования (тепловизионных систем, УФ-камер);



Рис. 4. БВС «Гиперкоптер D-830» с водородными топливными элементами

- использование управляемых гиросtabilизированных подвесов для установки аэросъёмочного оборудования;
- отсутствие специальных требований к площадке для взлёта и посадки (вертикальный взлёт и посадка);
- высокая мобильность систем и относительная простота эксплуатации.

Кроме того, мультикоптеры могут применяться в тех случаях, когда применение БВС самолётного типа ограничено или технически невозможно. Например, при полётах со следованием рельефу в местностях со значительным перепадом высот на небольших участках маршрута, а также при ограничении высоты полёта по условиям использования воздушного пространства.

Несмотря на большое количество преимуществ, существующие мультикоптеры существенно уступают БВС самолётного типа по дальности полёта. Поэтому ключевой особенностью БВС самолётного типа при обследовании ВЛ является высокая производительность выполнения работ.

Соответственно БВС самолётного типа целесообразно классифицировать по технической дальности полёта:

- до 100 км;
- от 100 до 400 км;
- от 400 км и более.

К первой категории можно отнести БАС eBee (senseFly, Швейцария), Trimble UX5 (Trimble Navigation Ltd, Бельгия). В основном это БВС с максимальной взлётной массой до 5 кг. Возможности установки аэросъёмочного оборудования ограничены. Как правило, используется только ограниченный перечень оборудования, предлагаемого производителем.

Во второй категории в основном БВС с максимальной взлётной массой от 5 до 15 кг. Это БАС «Геоскан 201» (группа компаний «Геоскан», Россия), Supercam S350 (группа компаний «Беспилотные си-

стемы», Россия), ZALA 421-04M (группа компаний ZALA AERO, Россия). Возможна установка различного аэросъёмочного оборудования и спутникового навигационного оборудования геодезического класса. БВС данной категории оптимальны для обследования отдельных линий и их участков.

Третья категория — БВС с максимальной взлётной массой от 15 до 30 кг включительно. На гражданском рынке представлена, например, беспилотными авиационными системами серии «Птеро-G» (ООО «ПТЕРО», группа компаний «Инэнерджи», Россия), «Орлан-10» (ООО «СТЦ», Россия). При обследовании протяжённых объектов значительная дальность полёта помимо непосредственно производительности выполнения работ определяет также возможность аэросъёмки объектов, значительно удалённых от точки взлёта/посадки БВС. Кроме того, большая масса носителей и высокая крейсерская скорость обеспечивают большую устойчивость при полёте по маршруту и меньшую зависимость от ветрового воздействия. Так, например, БВС «Птеро-G1» (рис. 5) разработан специально для выполнения аэросъёмки протяжённых объектов. Максимальная взлётная масса БВС составляет 20 кг, запас топлива обеспечивает дальность полёта до 800 км. Конструкция БВС позволяет устанавливать различное аэросъёмочное оборудование (в т.ч. нестандартное) общей массой до 5 кг.

ВИДЫ АЭРОСЪЁМКИ, ВАРИАНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ БАС И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ АЭРОСЪЁМОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Объекты электроэнергетики, в отношении которых выполняется аэрофотосъёмка, с точки зрения применения БАС можно условно разделить на три группы:

- точечные объекты: отдельные опоры ВЛ и объекты на подстанциях, участки пересечения ВЛ с природными и антропогенными объектами, другие локализованные объекты местности по трассе



Рис. 5. БВС «Птеро-G1» на пневматической катапульте

прохождения ВЛ. Одной из ключевых особенностей точечных объектов является их пространственное обследование с различных ракурсов;

- линейные — непосредственно воздушные линии электропередачи;
- площадные — территории электростанций, электроподстанций, отдельные участки местности, представляющие интерес с точки зрения обеспечения надёжного функционирования ВЛ.

Пользователями БАС могут быть как непосредственно внутренние службы организаций, эксплуатирующих ВЛ, так и внешние сервисные компании, предоставляющие услуги по диагностике объектов электросетевого хозяйства, или выполняющие инженерные изыскания. Кроме того, БАС могут применяться в интересах управляющих компаний и контролирующих органов. Причём речь идёт не только об объектах энергетических компаний, но и о ведомственных электросетях.

Возможные варианты применения беспилотных авиационных систем выглядят следующим образом:

- инженерно-технические работники, ремонтные бригады могут быть оснащены мультикоптерами для решения локальных задач в ходе очередных и внеплановых осмотров, а также при выполнении АВР (верховой осмотр, выявление мест повреждений ВЛ, в т.ч. на труднодоступных участках — сильнопересечённая, заболоченная местность и т.д.);
- комплексная диагностика ВЛ выполняется как с применением БВС самолётного, так и мультироторного типа;
- разовые работы большого объёма для задач проектирования, кадастра и прочих аналогичных задач выполняются с помощью БВС самолётного типа. Для нестандартных задач техническое оснащение и методы выполнения работ выбираются исходя из экономической целесообразности и технической эффективности.

В табл. 1 приведены основные особенности, выявляемые различными методами аэродиagnostики с помощью БАС [4, 5].

Табл. 1. Перечень особенностей ВЛ, выявляемых различными методами аэродиagnostики

Дефекты опор	<ul style="list-style-type: none"> • отсутствие, отрывы, погнутости элементов обрешётки металлических опор; • трещины в железобетонных опорах, деформации; • отклонение опор от вертикали; • разворот, деформации траверс на железобетонных опорах; • отсутствие натяжения внутренних стяжек и тросовых растяжек; • падения, повреждения опор
Дефекты провода, линейной и сцепной арматуры	<ul style="list-style-type: none"> • разрушение тарелок стеклянных и фарфоровых изоляторов, загрязнение изоляторов; • отсутствие и повреждение гасителей вибрации, смещение вдоль проводов относительно проектного положения; • наличие и расположение соединителей проводов; • изломы, отрывы лучей дистанционных распорок между проводами расщеплённой фазы; • обрыв проводов и грозотросов, расплетение проводов; • повреждения разрядников; • локальные нагревы проводов, шлейфов, контактных соединений проводов ВЛ; • коронные разряды на проводах и арматуре, поверхностные разряды на изоляторах
Параметры трассы ВЛ	<ul style="list-style-type: none"> • типы опор; • длина пролётов; • углы поворота трассы ВЛ; • габариты просеки; • расстояния до объектов; • пересечения с природными и антропогенными объектами
Дефекты, нарушения, процессы и явления на трассе ВЛ	<ul style="list-style-type: none"> • наличие и параметры древесно-кустарниковой растительности (ДКР) в охранной зоне, включая выявление опасной для эксплуатации растительности; • падение деревьев на провода и опоры; • строения и прочие объекты в охранной зоне; • навалы мусора, несанкционированные свалки мусора в охранной зоне ВЛ; • производство несанкционированной хозяйственной деятельности в охранной зоне ВЛ; • выявление опасных геологических процессов (эрозионные и оползневые процессы, заболачивание территорий, процессы, происходящие вследствие хозяйственной деятельности и т.д.); • определение наличия подъездных путей; • мониторинг состояния ВЛ в чрезвычайных ситуациях (паводковые ситуации, сход селей и снежных лавин, лесные и степные пожары и т.д.)

Ниже рассматриваются возможные методы аэродиагностики и особенности применения используемого аэросъёмочного оборудования.

АЭРОФОТОСЪЁМКА В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

Цифровые фотокамеры, используемые для аэрофотосъёмки, можно разделить на следующие категории:

- специальные камеры для аэрофотосъёмки (метрические). К ним относятся камеры Phase One серий iXU и iXU-RS, Hasselblad A6D;
- адаптированные камеры общего назначения («бытовые»). К ним относятся — полнокадровые камеры с матрицей формата 35 мм (Nikon D810/D850, Canon EOS 5DS, Sony α 7R II, DSC-RX1RM2) и неполнокадровые с матрицами форматов APS-H, APS-C, 4/3" и меньше (Sony DSC-RX100M5, Alpha A5000, Canon PowerShot S110).

Также необходимо отметить, что на некоторых мультикоптерах цифровая камера может выполнять как фото, так и видеосъёмку (например, камеры на гиросtabilизированных подвесах серии ZENMUSE от DJI).

Преимуществами фотосъёмки является высокое разрешение снимков (с учётом высоты съёмки), возможность фотограмметрической и тематической обработки результатов съёмки.

Надирная аэрофотосъёмка позволяет получить плановые снимки для последующей фотограмметрической обработки с целью построения ОФП, ЦММ и ЦМР, и другой производной продукции на интересующий участок местности, а также для выполнения стереоизмерений с целью определения стрел провеса проводов, определения углов наклона опор, высоты растительности и других объектов по трассе прохождения ВЛ, а также ряда дефектов.

В свою очередь, ОФП могут быть использованы для наполнения геоинформационных систем в качестве картографической основы, ситуационного анализа; ОФП, ЦМР и ЦММ — для определения ширины просеки, выявления опасной для эксплуатации ВЛ растительности, выполнения различных пространственных измерений и других задач.

Перспективная аэрофотосъёмка предназначена для получения видовых снимков в первую очередь для определения технического состояния ВЛ и её элементов. В случае выполнения съёмки с мультикоптера появляется возможность детального осмотра элементов конструкций ВЛ с расстояний до 1 м (рис. 6).

Кроме того для выполнения поиска мест аварий на линейных объектах в тёмное время суток при

АВР может использоваться ночная аэрофотосъёмка со вспышкой (разработка компании «ПТЕРО»); ввиду большого энергопотребления может эффективно использоваться только на БВС самолётного типа, оснащённых двигателем внутреннего сгорания с электрогенератором). Пример ночного аэрофотоснимка приведён на рис. 7.



Рис. 6. Верховой осмотр ВЛ с помощью квадрокоптера DJI Phantom 4



Рис. 7. Снимок трассы ВЛ, сделанный ночью при помощи специальной фотовспышки

ВИДЕОСЪЁМКА

Видеосъёмка используется в следующих случаях:

- при верховом осмотре опор ВЛ с использованием мультикоптера;
- при выполнении АВР для поиска мест повреждения ВЛ с использованием БАС самолётного типа;
- для оперативного мониторинга обстановки на значительных по протяжённости участках ВЛ в условиях чрезвычайных ситуаций с использованием БАС самолётного типа;
- в качестве дополнительного источника информации при выполнении тепловизионной и ультрафиолетовой съёмки.

Преимуществами видео являются:

- возможность наблюдения объектов, процессов явлений в динамике;
- возможность наблюдения в реальном времени;
- стабилизация видеоизображения при помощи гиросtabilизированных подвесов.

Многие производители БАС поставляют видеокамеры собственного производства (например, DJI). Кроме того на рынке предлагается ряд оптико-электронных систем на гиросtabilизированных подвесах сторонних производителей: FLIR Systems (США), DST CONTROL (Швеция), «СТД-Радикс» (Россия). Такие системы, как правило, устанавливаются на тяжёлые мультикоптеры и БВС самолётного типа.

ТЕПЛОВИЗИОННАЯ АЭРОСЪЁМКА

Для решения задач тепловизионного контроля ВЛ наиболее целесообразно использование матричных неохлаждаемых тепловизионных систем, работающих в диапазоне инфракрасного излучения 7—14 мкм (в зависимости от используемого сенсора диапазон может незначительно изменяться).

При тепловизионном контроле выявляются локальные нагревы проводов, шлейфов, контактных соединений проводов ВЛ, включая болтовые контактные соединения проводов ВЛ, сварные и контактные соединения, выполненные обжатием проводов ВЛ.

По возможностям измерения температуры тепловизионные системы делятся на наблюдательные и измерительные.

Наблюдательные тепловизионные системы для визуализации теплового излучения объектов используют представление интенсивности инфракрасного излучения с помощью выбранной цветовой шкалы. При этом получаемое изображение позволяет оценить лишь распределение температур по полю

кадра, но не даёт возможности измерить абсолютные значения температур. Примерами таких систем являются FLIR TAU640/Tau 2 (США), Iridium 640 (АО «ОКБ АСТРОН», Россия).

Измерительные тепловизионные системы помимо визуализации температурных полей позволяют выполнить бесконтактное измерение температур поверхностей (VarioCAM HD head 880 SL, Германия, ULIRVISION TI65, Китай).

Также необходимо отметить, что тепловизионные системы, представленные на рынке, могут выполнять кадровую съёмку или съёмку в режиме видео. При кадровой съёмке результатом является отдельная термограмма (растровое изображение), а при видео — видеопоследовательность.

Тепловизионная аэросъёмка воздушных линий электропередач с борта БВС самолётного типа неэффективна по следующим причинам:

- невысокое разрешение современных тепловизоров при достаточно большой высоте съёмки (удалённости от объекта), что затрудняет выявление локальных нагревов;
- высокая скорость полёта относительно поверхности земли и объектов съёмки, что в большинстве случаев обуславливает появление смазов на термограммах;
- высокая вероятность появления слепых зон.

Таким образом, имеет смысл рассматривать выполнение тепловизионного обследования ВЛ только с помощью оборудования, устанавливаемого на мультикоптеры на гиросtabilизированных подвесах.

СЪЁМКА В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

Съёмка ультрафиолетовыми камерами выполняется в диапазоне спектра от 240 до 280 нм, что позволяет выполнять съёмку при естественном дневном освещении, и выявлять коронные разряды на проводах и арматуре, поверхностные разряды на изоляторах.

Выбор подходящих УФ-камер на рынке ограничен. К числу моделей, которые могут быть установлены на БВС, относятся CoroCAM 6 DF (UVIRCO Technologies, ЮАР), OFIL DayCor Swift/ROMpact 300 (Ofil USA Ltd, США).

УФ-камеры имеют ряд конструктивных особенностей:

- малое разрешение сенсора;
- малый угол поля зрения объектива;
- низкая чувствительность матрицы, очень длинная выдержка для получения необходимых измерений.

С учётом указанных особенностей, эффективное применение УФ-камер возможно только на мультикоптерах, где обеспечиваются:

- возможность детального обследования объектов с небольших расстояний;
- удержание объекта в поле зрения УФ-камеры в течение длительного времени с использованием гиостабилизированных подвесов;
- минимальные эволюции в пространстве.

ВОЗДУШНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ

Воздушное лазерное сканирование позволяет определять геометрические параметры трассы ВЛ, вычислять стрелу провеса провода, строить ЦМР и ЦММ.

Наибольшая эффективность лазерного сканирования достигается с одновременным выполнением аэрофотосъёмки.

Большинство предлагаемых в настоящее время лазерных сканеров для БАС имеет небольшую дальность съёмки (не более 150 м при 80 % отражательной способности поверхности), поэтому их целесообразно использовать только на мультикоптерах для решения локальных задач. Примером таких сканеров являются YellowScan Mapper Vx и Surveyor (YellowScan, Франция), Routsene LidarPod (Mapix technologies Ltd, Шотландия).

Единственным производителем воздушных лазерных сканеров, которые могут быть достаточно эффективно использованы на БВС самолётного типа, является австрийская компания RIEGL (модели сканеров RIEGL VUX-1UAV, miniVUX-1UAV, miniVUX-1DL).

Тем не менее на данный момент применение воздушных лазерных сканеров для съёмки воздушных линий электропередачи носит, скорее, экспериментальный характер.

Заметим, что все данные съёмки, получаемые одним из рассмотренных выше методов, представляют наибольшую ценность для последующей обработки и анализа, только если они имеют пространственную привязку. В самом простом случае привязка осуществляется по данным бортового навигационного спутникового приёмника (как правило, GPS или ГЛОНАСС-GPS). Точности таких приёмников вполне достаточно, чтобы однозначно привязать материалы съёмки к конкретному участку ВЛ.

Для задач, где требуется регламентированная действующей нормативно-технической документацией точность получаемых исходных данных и результатов их обработки (например, создание картографической продукции, выполнение стереовек-

торизации) необходимо использовать оборудование глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) геодезического класса. Применяются как одночастотные, так и двухчастотные приёмники в зависимости от технологии выполнения спутниковых измерений и их обработки. В основном используются приёмники, поддерживающие приём сигналов от 1 до 3 спутниковых навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС, BeiDou). Кроме того для пространственной привязки совместно с оборудованием ГНСС могут использоваться инерциальные навигационные системы (ИНС). Они в первую очередь необходимы для получения точных угловых элементов ориентирования снимков, что позволяет в ряде случаев автоматизировать и повысить скорость обработки данных съёмки. Кроме того, использование ИНС вместе с оборудованием ГНСС позволяет перейти к прямому геопозиционированию при сохранении необходимого уровня точности, когда аэросъёмочные работы выполняются без создания наземного плано-высотного обоснования. А выполнение воздушного лазерного сканирования без использования ИНС и ГНСС просто невозможно.

Обобщающие данные по видам работ и применяемым типам БВС приведены в табл. 2. Для каждого вида аэродиагностики выбирается соответствующий тип БВС, обеспечивающий оптимальное решение задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, что применение БАС в электроэнергетике в ближайшие годы будет только развиваться. Любая современная БАС — это технически сложное изделие, требующее определённого уровня подготовки пользователей и культуры эксплуатации.

Как показано выше, универсальных систем, способных охватить весь спектр задач по диагностике ВЛ, просто не существует. Однако правильный выбор технического решения является залогом успешного решения рассмотренных задач по сбору пространственных данных о воздушных линиях электропередачи и об их техническом состоянии. При этом применение БАС должно производиться с соблюдением технологии выполнения работ для выбранного аэрометода.

Наибольшая же эффективность аэродиагностики ВЛ с помощью БАС достигается при комплексном подходе, когда получаемые данные обрабатываются и анализируются средствами геоинформационного программного обеспечения, а результирующая информация затем используется в системах управления предприятием.

Табл. 2. Возможности выполнения различных видов аэродиagnостики в зависимости от используемых типов БВС

Вид съёмки	Результат работ/вид результирующей продукции	Возможность выполнения работ указанным типом БВС	
		мультикоптер	самолёт
Аэрофотосъёмка в видимом диапазоне спектра для получения измерительной продукции	Картографическая и геодезическая продукция (ОФП, ЦМР, ЦММ, топографический план, продольный профиль трассы, уклоны и т.д.)	+	+
	Определение габаритов просеки, параметров ДКР	+	+
	Трёхмерная реконструкция геометрии проводов	+	+
Аэрофотосъёмка в видимом диапазоне спектра для фиксации общего технического состояния объектов	Плановые и перспективные снимки для визуальной оценки технического состояния конструктивных элементов ВЛ и ситуационного анализа	+	+
Ночная аэрофотосъёмка	Геопривязанные изображения в видимом диапазоне спектра	-	+
Видеосъёмка	Детальный осмотр ВЛ в режиме реального времени для оперативного принятия решений (верховой осмотр) с записью видео для анализа в камеральных условиях	+	-
	Мониторинг ВЛ во время ЧС	+	+
	Решение охранных задач (мониторинг охранных зон ВЛ и объектов инфраструктуры в режиме реального времени для оперативного принятия решений)	+	+
Тепловизионная съёмка	Выявление локальных нагревов по геопривязанным термограммам	+	-
Съёмка в УФ-диапазоне	Выявление коронных и поверхностных разрядов по геопривязанным эпограммам	+	-
Воздушное лазерное сканирование	ЦМР, ЦММ	+	+
	Определение габаритов просеки, параметров ДКР	+	+
	Трёхмерная реконструкция геометрии проводов	+	+

ЛИТЕРАТУРА

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. — С. 56—59.
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. Дикой В.П. *Мониторинг состояния воздушных линий электропередачи с использованием беспилотного летательного аппарата* / В.П. Дикой, А.А. Левандовский, Р.С. Арбузов, А.Г. Овсянников, В.В. Старцев // ЭНЕРГИЯ ЕДИНОЙ СЕТИ. — 2014. — № 2. — С. 16—25.
5. Валиев А.В. *Возможности диагностики состояния ВЛ с использованием беспилотной авиационной системы Птеро-G0* / А.В. Валиев // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. — 2015. — № 3. — С. 72—75.