

УДК 621.315.177

Разработка роботизированного летательного комплекса для мониторинга состояния линий электропередач

И.А. Габитов, Н.Б. Маллаев

Габитов Ильдар Азатович — старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники Дагестанского государственного технического университета, e-mail: gabitovia@mail.ru

Маллаев Ниматула Базаевич — студент Московского государственного университета информационных технологий, радиотехники и электроники, e-mail: nimat1994@mail.ru

Рассмотрена перспектива внедрения мобильного беспилотного роботизированного комплекса для мониторинга состояния линий электропередач (ЛЭП), являющегося одним из обязательных мероприятий, которые проводят энергосетевые компании в целях поддержания бесперебойности работы энергосистемы. При эксплуатации ЛЭП на долю аварийных отключений высоковольтных линий (ВЛ) приходится 25 % от всех отключений. Осмотр ЛЭП выполняют линейные обходчики-электромонтеры, проходящие по трассе с целью ее визуальной проверки. Выполняются также верховые осмотры, не всегда безопасные для жизни персонала. В труднодоступных местах проверку состояния выполняют с помощью вертолета, что иногда оказывается экономически не выгодно.

Из проведенного анализа следует, что основными недостатками существующих комплексов контроля является их недостаточная информативность и плохая адаптированность для работы в условиях высокого электромагнитного поля. К тому же для их развешивания при отключенном напряжении необходим вертолет для подъема.

Задачей, на решение которой направлен предлагаемый проект, является повышение степени достоверности данных мониторинга ЛЭП и обеспечение возможности удаленного визуального инспектирования состояния проводов ЛЭП. Новизной комплекса являются конструкция, позволяющая осуществлять стыковку комплекса к проводам ЛЭП без отключения напряжения, а также система и алгоритм обработки результатов, позволяющие снизить нагрузку на оператора за счет видеоаналитики, которая минимизирует количество фонового видеопотока. В отличие от беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) самолетного типа, для которых требуется подготовленное место взлета и посадки, предлагаемый комплекс может взлетать с любого места, что особо актуально для труднодоступных мест, например горной местности.

Разработанное устройство позволяет зависать на максимально приближенном расстоянии от проводов, а также при необходимости производить стыковку к проводам ЛЭП. Это позволяет получать качественный поток видеoinформации в разных спектрах частот и ракурсов элементов ЛЭП. Проведенные испытания показали, что результаты измерения, получаемые с борта предлагаемого комплекса, являются высокоточными. Данный комплекс будет иметь высокую применимость в электроэнергетике, учитывая, что своевременное и достоверное обнаружение дефектов и неудовлетворительного состояния проводов ЛЭП и линейной арматуры — главная задача, к которой стремится современная электроэнергетика.

Ключевые слова: мониторинг, линии электропередач, беспилотный летающий аппарат, состояния ЛЭП, роботизированный комплекс.

Development of a Robotic Flying Vehicle for Monitoring the Condition of Power Lines

I.A. Gabitov, N.B. Mallaev

Gabitov Ildar A. — Senior Lecturer of Theoretical and General Electrical Dept., Dagestan State Technical University, e-mail: gabitovia@mail.ru

Mallaev Nimatula B. — Student of the Moscow State University of Information Technologies, Radio Engineering and Electronics, e-mail: nimat1994@mail.ru

The prospects of putting in use a mobile robotic drone-aided system for monitoring the condition of power lines are considered. Monitoring and inspection of power lines are among the mandatory measures carried out by electric network companies in order to maintain uninterrupted operation of the power grid. During power grid operation, emergency tripping of high-voltage overhead power lines account for 25% of all disconnections in the power system. According to the existing practices, power lines are inspected by patrol linemen, who walk along the power line route for visually checking its condition. Inspections involving climbing/ascending over the power line supports are also carried out, which, however, are not always absolutely free from life-threatening risk. The condition of power lines passing in hard-to-reach-areas is inspected using a helicopter, which sometimes turns to be an economically unprofitable measure.

It follows from the performed analysis that the main drawbacks of the existing facilities for monitoring the condition of power lines is that they provide insufficient information and that they are poorly adapted to operation under the conditions of a strong electromagnetic field. In addition, a helicopter is required to ascend these systems for monitoring a de-energized power line.

The proposed project is aimed at achieving more reliable power line monitoring data and obtaining the possibility to perform remote visual inspection of the condition of power line wires. The proposed system is characterized by a number of new features. Thus, its design allows the system to be connected to the power line wires without the need to de-energize the line. In addition, the system and the input data processing algorithm reduce the information burden on the operator owing to the availability of video data analysis functions, which minimize the amount of background flow of video data. Unlike airplane-type unmanned flying vehicles, which need a specially prepared runway for takeoff and landing, the proposed system can lift off from any place, a feature that is of special importance for hard-to-reach places, e.g., in a mountainous terrain.

The developed device can hover at the closest distance to wires and, if necessary, it can be put in contact with the power line wires. All these features make it possible to obtain a flow of high-quality information in different frequency spectra and foreshortenings of power line elements. Tests of the developed system have shown that the measurement data obtained from its mobile part feature high accuracy. In view of the fact that timely and reliable detection of flaws and unsatisfactory condition of power line wires and power line accessories is among the main problems faced by the modern electric power industry, the proposed system will find an extensive use in the industry.

Key words: monitoring, power lines, drone, power line condition, robotic system.

В настоящее время мониторинг и проверка состояния линий электропередач является одним из обязательных мероприятий, которые проводят энергосетевые компании в целях поддержания бесперебойности работы энергосистемы. При эксплуатации ЛЭП доля аварийных отключений ВЛ составляет 25 % (недостатки эксплуатации и ремонта) от всех отключений. К основным видам повреждений при эксплуатации ЛЭП можно отнести: перекрытие воздушных изоляционных промежутков между проводами, наличие обрывов и оплавлений отдельных проволок и мест соединения проводов, наличие набросов, величину стрелы провеса и др.

Согласно РД 34.20.501–95 «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации», периодичность осмотров и проверок составляет не менее одного раза в год [1]. Визуальный осмотр ЛЭП преимущественно выполняют линейные обходчики-электромонтеры, проходящие пешком вдоль участков трассы линий электропередач. Что касается верхних осмотров, то они не всегда безопасны для жизни персонала. В труднодоступных местах проверку состояния выполняют с помощью вертолета, что иногда оказывается экономически не выгодно. С учетом этого применение мобильного автономного роботизированного летательного комплекса является оправданным решением данной задачи [2].

Анализ технических источников и работы ряда сетевых компаний показывает, что роботизированные комплексы использовались в западных странах в качестве измерительного оборудования для мониторинга ЛЭП с начала 2000 г. Научно-исследовательский институт Канады Hydro-Québec выпустил прототип передвигного роботизированного комплекса LineScout [3] в 1998 г. Прототип выполнен в виде передвижной тележки, на которой закреплены видеокамеры и измерительное оборудование. Робот использовался для осмотра работающих линий высокого напряжения. Внешний вид робота LineScout представлен на рис. 1. Достоинством

робота LineScout является возможность его управления оператором в режиме реального времени.

К недостаткам робота можно отнести:

- необходимость ручной установки робота на провод и снятия его с провода, а также перевеса с одного провода на другой [4]. Для этого требуются специальная техника (автовышка) и обслуживающий персонал, что повышает финансовые затраты на эксплуатацию робота и осложняет его использование в труднодоступных районах;

- необходимость управления оператором, для чего требуется подготовка квалифицированных специалистов.

Компания Japan's Kansai Electric Power Co в 2011 г. представила коммерческий проект робота Expliner [5], предназначенного для проверки состояния высоковольтных линий электропередач. Робот подвешивается к проводам и медленно передвигается по ним с помощью колесного привода. Внешний вид робота Expliner приведен на рис. 2.

На корпусе робота закреплен манипулятор с измерительным оборудованием для осмотра линий, который также служит в качестве противовеса для баланса. Большой проблемой для данного робота является пересечение препятствий, возникающих на линии: прокладок, которые удерживают провода (встречаются через каждые 30 м) и устройств, поддерживающих провод. Expliner обходит такие препятствия с помощью противовеса, сдвигая центр тяжести робота, что позволяет приподнять колеса или сдвигать по отдельности каждую ось. В случае сложного препятствия, например серии изоляторов, для перестановки робота требуется ручной перенос.

В России реализовано несколько проектов для контроля состояния ЛЭП на основе БПЛА самолетного типа. Один из таких коммерческих проектов реализует компания ZALA AERO [6] на базе БПЛА самолетного типа ZALA 421-16. Данный комплекс оборудован встроенной цифровой системой телеметрии и предна-



Рис. 1

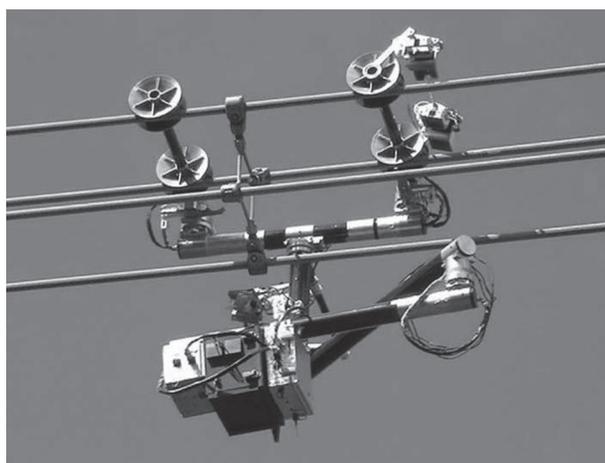


Рис. 2

значен для мониторинга ЛЭП на удалении до 50 км с передачей видеоизображений в режиме реального времени. Аналогичный коммерческий проект реализует компания «АФМ-Серверс» с использованием БПЛА «Птеро-G0» [7]. Данный комплекс — также самолетного типа с установленным двигателем внутреннего сгорания. На борту размещено оборудование телеметрии, также система имеет возможность записи и архивирования полученных результатов.

БПЛА самолетного типа имеют преимущества запаса длительности летного времени по сравнению с предлагаемым проектом. Однако следует учесть, что основным и главным недостатком таких БПЛА является минимально допустимая летная скорость 90 км/ч. Из-за низкого качества изображения, получаемые с борта на такой скорости, не обладают достаточной информативностью, и на них трудно различить повреждения линейной арматуры и проводов ЛЭП. К тому же плоскость прохождения БПЛА является однолинейной,

поэтому изображения с борта получаются с одного ракурса, что не дает полной картины состояния габарита провода и опор ЛЭП [8].

Из проведенного анализа следует, что основными недостатками существующих комплексов является то, что эти устройства недостаточно информативны и не адаптированы для работы в условиях высокого электромагнитного поля, и то, что для их развертывания при отключенном напряжении необходим вертолет для подъема.

Задачей, на решение которой направлен предлагаемый проект, является повышение степени достоверности данных мониторинга ЛЭП и обеспечение возможности удаленного визуального инспектирования состояния проводов ЛЭП. Новизной предлагаемого комплекса являются конструкция, позволяющая осуществлять стыковку комплекса к проводам ЛЭП без отключения напряжения, а также система и алгоритм обработки результатов, позволяющих снизить нагрузку на оператора за счет видеоаналитики, которая минимизирует количество фонового видеопотока. Отличие от БПЛА самолетного типа, для которого требуется подготовленное место взлета и посадки, состоит в том, что предлагаемый комплекс может взлетать с любого места, что особенно актуально для труднодоступных мест, в том числе и для горной местности.

Мобильный автономный роботизированный летательный комплекс, показанный на рис. 3, выполнен с учетом приведенных требований. Конструкция выполнена на рамной платформе и состоит из двух частей: модуля винтовой силовой установки 2 и горизонтально-передвижного модуля 1, в сборе представляющих единый комплекс. Соединение модулей 1 и 2 выполнено из диэлектрического упругого материала, увеличивающего виброустойчивость и одновременно обеспечивающего гальваническую развязку модулей. В свою очередь к модулю 2 присоединены лучи 3 с поворотными механизмами 4, на которых установлены несущие винты 5. Также на лучах 3 установлены акселерометры и трехосевые гироскопы позиционирования. К горизонтально-передвижному модулю 1 закреплена пара передвигающихся роликов 6. Ролики выполнены с возможностью регулирования расстояния между канавками (для универсальности использования комплекса на разных классах напряжения). Регулирование осуществляется с помощью серводвигателей, расположенных внутри ролика. Для устойчивости при ветровых порывах на модуле 2 закреплены направляющие компенсаторы 7, также выполняющие функции направляющих при посадке на провода ЛЭП. На модуле 1 установлены высокоскоростные камеры 12 со смещением друг относительно друга на 120° в пару к сенсорам регистрации электромагнитных волн. На передней части комплекса установлена гиросtabilизированная камера 8 с фильтром для обнаружения коронного разряда и пробоев в изоляторах. На горизонтально-передвижном

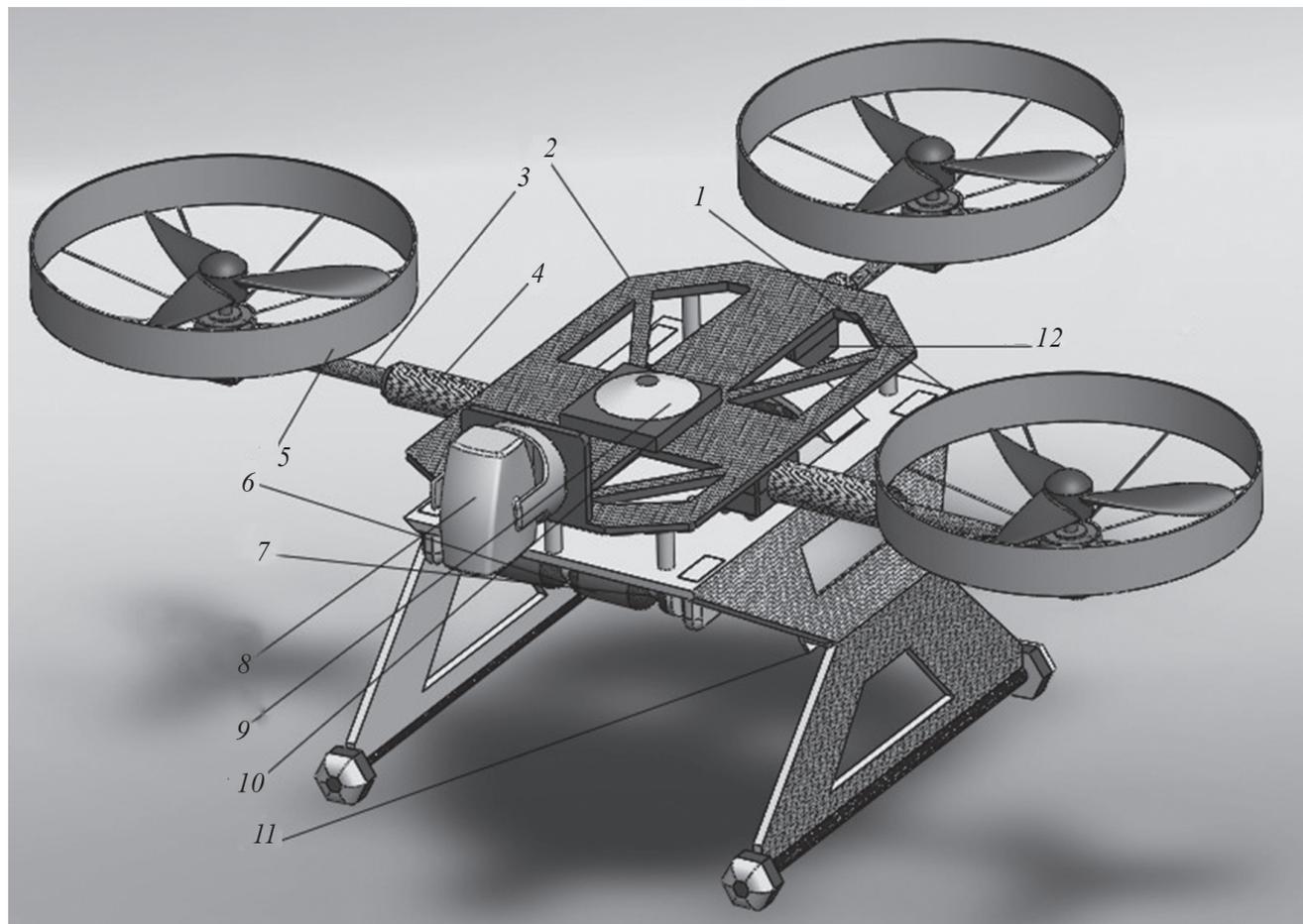


Рис. 3

модуле также установлены центральный блок управления (ЦБУ) 10 и система навигации GPRS 9. На боковых опорах шасси модуля 2 имеются вспомогательные сенсоры позиционирования 11, которые служат для стыковки комплекса с проводами ЛЭП.

Мобильный автономный роботизированный летательный комплекс функционирует следующим образом. Взлет устройства осуществляется из заданной точки N , которая заранее известна и связана по системе GPRS с комплексом. Движение комплекса происходит в декартовой системе координат X, Y, Z . Подъем устройства осуществляется за счет подъемной силы несущих винтов. На каждом из трех лучей комплекса установлены акселерометры и трехосевые гироскопы, которые в каждый момент времени отправляют сигнал в ЦБУ 10, идентифицирующий точные координаты x, y, z комплекса в текущий момент времени. В зависимости от значения входного сигнала, ЦБУ формирует команды управления двигателем, которые способствуют поддержанию заданной устойчивой позиции комплекса. Траектория набора высоты определяется автоматической зависимостью от получаемого сигнала уровня электромагнитного поля и учитывает безопасное расстояние от проводов ЛЭП (рис. 4).

По достижении уровня высоты проводов ЛЭП несущие винты переходят в режим «малого газа», где

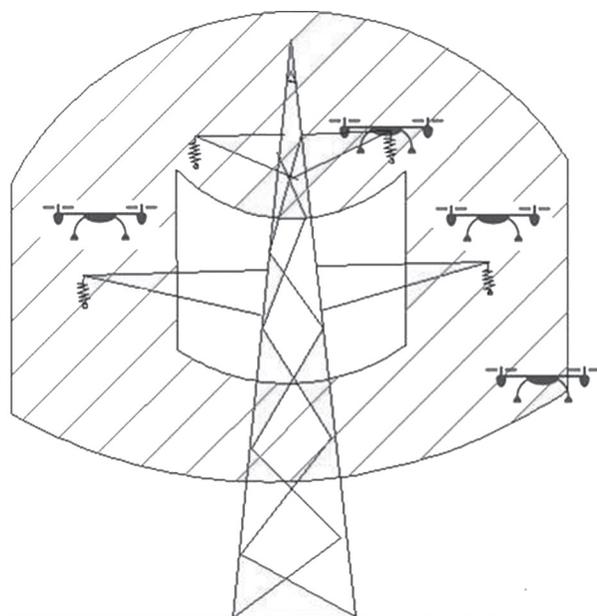


Рис. 4

аэродинамической силы достаточно для того, чтобы удержать устройство на заданной высоте и продолжать движение в горизонтальной плоскости. В последующем за счет поворотных механизмов, которые распо-

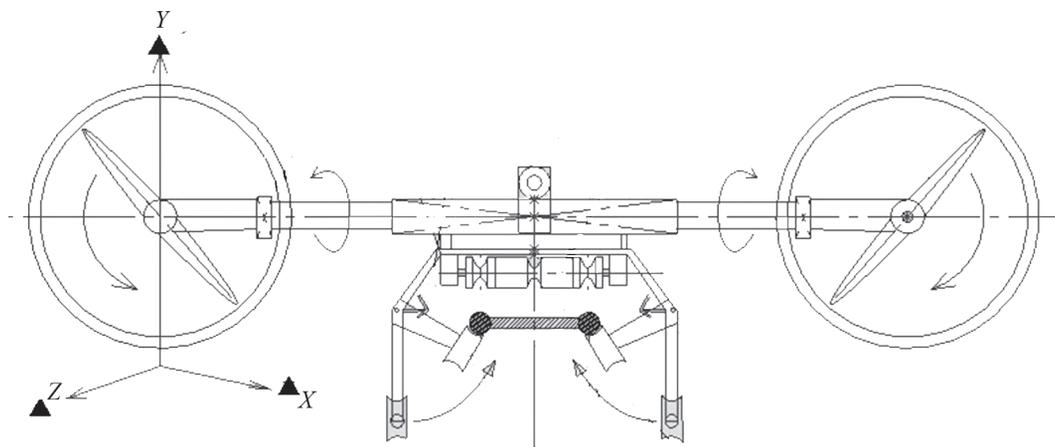


Рис. 5

ложены в лучах, комплекс переходит в режим позиционирования, т. е. обеспечивается стыковка с проводами линий электропередач. Это действие обеспечивается за счет сенсоров. Перечисленные операции, т. е. набор высоты и стыковка, выполняются автоматически с учетом всех факторов влияния (ветра, электромагнитного поля), исключая фактор ошибки оператора. Передвижение комплекса по проводам ЛЭП осуществляется за счет изменения угла несущих винтов, тем самым управляя воздушным потоком, как показано на рис. 5.

Измерение и мониторинг состояния проводов ЛЭП происходит следующим образом. С помощью высокоскоростных камер, которые смещены друг относительно друга на 120° , сенсоры электромагнитных волн регистрируют высокочастотные электромагнитные импульсы, сосредоточенные вокруг проводов ЛЭП, которым свойственно меняться в зависимости от состояния провода. Учитывая, что камеры находятся на небольшом расстоянии от проводов ЛЭП, изображения, получаемые с этих камер, достаточно качественны и информативны. Также на передней части комплекса установлена гиростабилизированная камера с инфракрасным (ИК) и ультрафиолетовым (УФ) фильтрами для обнаружения коронного разряда и пробоев в изоляторах и для проверки состояний линейной арматуры. Данные с борта комплекса через передатчик, расположенный в ЦБУ, по беспроводному каналу связи отправляются на пульт оператора. Обработка полученных данных происходит на пульте у оператора. Для обработки видеoinформации, получаемой с борта, используются видеоаналитические алгоритмы. Обработку проходят и данные, получаемые с сенсоров электромагнитных волн с ИК и УФ камер. После обработки данные, полученные с сенсоров, а также видео в УК диапазоне накладываются на видеопоток с камер, тем самым образуя одну картину, что способствует облегчению восприятия оператором, а также достоверности информации.

Алгоритм видеоаналитики выстроен следующим образом. Если в определенный момент времени данные с

датчиков отклоняются на некоторое значение, что приводит к изменению спектра в УК диапазоне, то видеоаналитика в предполагаемом месте на видеопотоке отражает это, передавая оператору тревожное сообщение. Оператор получает эти данные в виде готовых результатов на видеопотоке. На рис. 6 представлен результат обнаружения (коронного разряда) на ЛЭП, полученный с борта комплекса.

Из представленного исследования можно сделать следующие выводы. Разработанное устройство позволяет зависать на максимально приближенном расстоянии от проводов, а также при необходимости производить стыковку к проводам ЛЭП. Это позволяет получать качественный поток видеoinформации в разных спектрах частот и ракурсов элементов ЛЭП. Проведенные испытания показали, что результаты измерения, получаемые с борта предлагаемого комплекса, являются высокоточными. Данный комплекс будет иметь высокую применимость в электроэнергетике, учитывая, что своевременное и достоверное обнаружение дефектов и неудовлетворительного состояния проводов ЛЭП и линейной арматуры — главная задача, к которой стремится современная электроэнергетика.

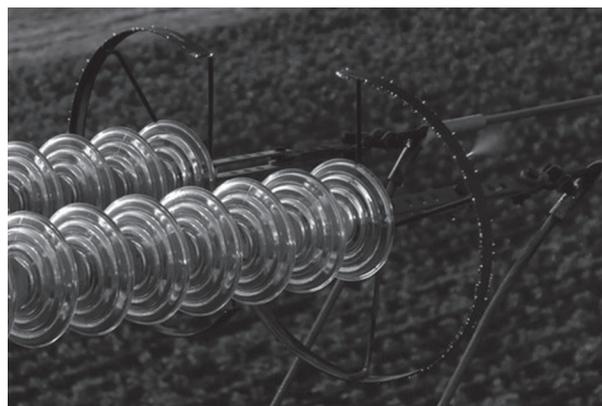


Рис. 6

Литература

1. **Обзор** новых технологий в энергетике. Департамент технического развития ОАО «МРСК Центра», 2008. Вып. 1.

2. **Валиев А.В.** Дистанционная диагностика воздушных линий при помощи беспилотных летательных аппаратов: Сб. докл. на VII науч.-практич. семинаре Общественного совета специалистов по диагностике электрических установок. Хабаровск, 2012. С. 33—38.

3. **Робот** LineScout на линиях электропередач // Мир роботов Roboting.ru. URL: <http://roboting.ru/1253-robot-linescout-na-liniyah-yelektroperedach.html> (дата обращения 12.10.2011)

4. **Tahar M., Zemalache K.M., Omari A.** Control Of Under-Actuated X4-flyer Using Indegral Backstepping Controller. Przegląd Elektrotechniczny // Electrical review. 2011. P. 251—256.

5. **Робот** Expliner инспектирует высоковольтные линии // Мир роботов Roboting.ru. URL: <http://roboting.ru/957-robot-expliner-inspektiruet.html> (дата обращения 13.10.2011)

6. **ZALA 421-16.** Беспилотный самолет большой дальности с системой автоматического управления (автопилот). URL: <http://zala.aero/zala-421-16e-2/>

7. **Валиев А.В.** Возможности диагностики состояния ВЛ с использованием беспилотной авиационной системы Птеро-G0 // Электроэнергия. 2015. № 3.

8. **Макаренко Г.К., Алешечкин А.М.** Анализ погрешностей определения координат объектов на телевизионных изображениях при дистанционном обследовании воздушных линий электропередачи // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 12. С. 1—16.

References

1. **Obzor** Novyh Tehnologij v Jenergetike. Departament Tehnicheskogo Razvitija ОАО «MRSK Centra», 2008. Vyp. 1. (in Russian).

2. **Valiev A.V.** Distancionnaja Diagnostika Vozdushnyh Linij pri Pomoshhi Bepilotnyh Letatel'nyh Apparatov: Sb. Dokl. na Vii Nauch.-Praktich. Seminare Obshhestvennogo Soveta Specialistov po Diagnostike Jelektricheskikh Ustanovok. Habarovsk, 2012:33—38. (in Russian).

3. **Robot** Linescout na Linijah Jelektroperedach // Mir Robotov Roboting.ru. URL: <http://roboting.ru/1253-robot-linescout-na-liniyah-yelektroperedach.html> (data obrashhenija 12.10.2011). (in Russian).

4. **Tahar M., Zemalache K.M., Omari A.** Control of Under-actuated X4-flyer Using Indegral Backstepping Controller. Przegląd elektrotechniczny. Electrical review. 2011:251—256.

5. **Robot** Expliner Inspektiruet Vysokovol'tnye Linii // Mir robotov Roboting.ru. URL: <http://roboting.ru/957-robot-expliner-inspektiruet.html> (data obrashhenija 13.10.2011). (in Russian).

6. **ZALA421-16.** Bepilotnyj Samolet Bol'shoj Dal'nosti s Sistemoj Avtomaticheskogo Upravljenija (Avtopilot). URL: <http://zala.aero/zala-421-16e-2/> (in Russian).

7. **Valiev A.V.** Vozmozhnosti Diagnostiki Sostojanija VI s Ispol'zovaniem Bepilotnoj Aviacionnoj Sistemy Ptero-G0. Jelektrojenergija. 2015;3. (in Russian).

8. **Makarenko G.K., Aleshechkin A.M.** Analiz Pogreshnostej Opredelenija Koordinat Obektov na Televizionnyh Izobrazhenijah pri Distancionnom Obsledovanii Vozdushnyh Linij Jelektroperedachi. Zhurnal radiojelektroniki. 2012;12:1—16. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 03.11.2015