

The Mode of Constructing Safe Trajectories of Motion of the Unmanned Aerial Vehicle while Monitoring Power Lines Considering the Influence of their Electromagnetic Fields

Shabanova A.R., Tolstoy I.M., Lebedev I.V.

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of
the Russian Academy of Sciences
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The aim of this paper is to increase the flight safety of an unmanned aerial vehicle that monitors power lines under the negative influence of electromagnetic fields on the on-board equipment. This problem was solved with algorithms for photo- and video-imaging and determination of wire sag. The development of monitoring algorithms should overcome the limitations of the existing solutions. Particularly, various systems employ suboptimal routes of aerial vehicle, as well introduce non-universal constraints of flight zone. Besides, the considered approaches do not account for peculiarities of aerial imaging and for structural specifics of power line elements. This leads to poorer image processing performance and causes additional errors. To improve evaluation of power line characteristics, the algorithm of aerial imaging is proposed, which includes vehicle position adjustment relative to wire for two imaging settings. To ensure safe performance of onboard hardware, a calculation methodology for electromagnetic field distribution is presented, which allows determine the minimum distance between the wire and the vehicle. Experimental results, obtained in simulator, show 90.22% accuracy of the proposed method. The most important research outcomes consist in achieved refinement of aerial imaging in overhead power line monitoring, as well in automation of wire sag calculation based on image data. The scientific relevance of the research consists in potential improvement of fault-tolerance of power transmission networks and decrease of power losses because of early recognition of power line failures and due repair. Consequently, maintenance costs of overhead power line service can be optimized.

Keywords: overhead power transmission lines, monitoring, unmanned aerial vehicles, aerial imaging algorithms, wire sag, power line electromagnetic fields.

DOI: 10.5281/zenodo.3562201

Metodă de a construi traectorii sigure de mișcare a aparatului de zbor fără pilot aflat sub influența câmpurilor electromagnetice la monitorizarea liniilor electrice

Shabanova A.R., Tolstoy I.M., Lebedev I.V.

Institutul de Informatică și Automatizare din Sankt Petersburg al Academiei de Științe din Rusia,
Sankt Petersburg, Federația Rusă

Rezumat. Scopul acestei lucrări constă în sporirea siguranței la zbor a unui aparat de zbor fără pilot, care monitorizează liniile electrice a căror câmpuri electromagnetice au un impact negativ asupra funcționării echipamentelor de bord. Problema a fost rezolvată prin dezvoltarea de algoritmi pentru fotografie și video și determinarea săgeții conductorului în deschizătură în calitate de parametru structural principal al liniei. Rezultatul cel mai important al studiului constă în precizarea specificului fotografierii și filmărilor video în timpul monitorizării liniilor aeriene, precum și automatizarea procesului de determinare a săgeții după imagini. Semnificația rezultatelor constă în majorarea siguranței operaționale a aparatului de zbor fără pilot în timpul procesului de monitorizare, sporirea fiabilității rețelelor electrice, reducerea pierderilor de energie datorită detectării în timp la defectele elementelor liniilor electrice aeriene, ceea ce, la rândul său, va conduce la reducerea costurilor de deservire a liniilor electrice. Multe sisteme de monitorizare se caracterizează printr-o construcție non-optimală a traectoriilor aeronavei, precum și prin introducerea unor restricții non-universale asupra zonei de zbor. Abordările utilizate nu iau în considerare specificul fotografierii foto și video și caracteristicile de proiectare ale elementelor liniilor aeriene, ceea ce duce la diminuarea eficienței procesării imaginii și la apariția unor erori suplimentare. Sporirea preciziei evaluării parametrilor de proiectare a liniei urmare a modalității de realizare a algoritmului fotografierii foto și video se asigură prin ajustarea poziționării aparatului de zbor în raport cu conductorul liniei pentru două cazuri de fotografiere: de sus și de partea laterală a conductorului. Precizia metodei propuse pentru determinarea săgeții conductoarelor fazelor s-a estimat la nivel de 90,22%.

Cuvinte-cheie: linii electrice aeriene, monitorizare, algoritmi de fotografie aeriană, săgeata conductorului, câmpul electromagnetic al liniilor electrice.

Способ построения безопасных траекторий движения беспилотного летательного аппарата при мониторинге линий электропередач в условиях влияния электромагнитных полей
Шабанова А.Р., Толстой И.М., Лебедев И.В.

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук
 Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Целью данной работы является повышение безопасности полета беспилотного летательного аппарата, осуществляющего мониторинг линий электропередачи в условиях негативного влияния электромагнитных полей на работу бортового оборудования. Поставленная задача была решена путем разработки алгоритмов фото- и видеосъемки, и определения стрелы провеса провода как основного конструктивного параметра линии. Наиболее важным результатом исследования является уточнение специфики проведения фото- и видеосъемки при мониторинге воздушных линий, а также автоматизация процесса определения стрелы провеса по изображению. Значимость результатов работы заключается в повышении безопасности функционирования летательного аппарата в процессе мониторинга, а также отказоустойчивости электроэнергетических сетей и сокращении потерь электроэнергии за счет своевременного выявления и реагирования на неисправности элементов воздушных линий, что, в свою очередь, позволит уменьшить экономические издержки обслуживания линий электропередачи. Разработка алгоритмов проведения мониторинга при помощи беспилотного летательного аппарата была нацелена на преодоление недостатков существующих решений. В частности, для многих систем характерно неоптимальное построение траекторий движения летательного аппарата, а также введение неуниверсальных ограничений области полета. Предложен способ устранить недостатки рассмотренных в работе подходов, так как они не учитывают специфику проведения фото- и видеосъемки и конструктивные особенности элементов воздушных линий, что приводит к снижению эффективности обработки изображений и возникновению дополнительных ошибок. С целью повышения точности оценки конструктивных параметров линии алгоритм проведения фото- и видеосъемки предусматривает корректировку положения летательного аппарата относительно провода для двух случаев съемки: сверху и сбоку провода. Для обеспечения безопасной работы бортовой аппаратуры разработана методика расчета карты распределения электромагнитного поля вблизи линий электропередачи, которая позволяет определить минимальное предельное расстояние от провода до летательного аппарата. По результатам тестирования, проведенного в виртуальной среде, точность предложенной методики определения стрелы провеса была оценена на уровне 90,22%.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, мониторинг, алгоритмы аэросъемки, стрела провеса, электромагнитное поле линий электропередачи.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективным решением при реализации систем мониторинга линий электропередачи (ЛЭП) является использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Различают два типа БЛА: с фиксированным крылом (самолетный) и мультироторы (вертолетный). Аппараты с фиксированным крылом имеют большую скорость и высоту полета по сравнению с мультироторными БЛА и больше подходят для мониторинга растительности в охранных зонах и грубой оценки состояния ЛЭП. Для получения детальных изображений компонентов ЛЭП зачастую используются БЛА вертолетного типа. Конструкция БЛА с вращающимся крылом содержит от 4 до 8 роторов и обеспечивает вертикальный взлет и посадку. БЛА самолетного типа совершают горизонтальный взлет и посадку и не предназначены для парения в воздухе. Однако высокая скорость полета негативно сказывается на качестве фото/видеоизображений. Поэтому для

проведения инспектирования ЛЭП предпочтительнее использовать БЛА вертолетного типа.

Различают два вида причин крушения БЛА при выполнении полетных задач: внешние и внутренние. Внутренние причины обусловлены человеческим фактором при управлении полетом летательного аппарата, внешние предполагают нарушение работы бортовой аппаратуры [1]. В 2016 г были исследованы 152 отчета по крушениям БЛА, которые произошли за 10 лет, с 2006 по 2015 г [2]. По результатам анализа, 32% инцидентов происходит по вине человека, 63% крушений случается из-за неисправностей бортовой аппаратуры, 5% — из-за природных явлений.

На работе электротехнического оборудования БЛА может негативно сказаться влияние электромагнитного поля (ЭМП) ЛЭП [3]. Нарушение работы технических средств БЛА может привести к дестабилизации положения беспилотника в пространстве и последующему крушению летательного аппарата. При проведении работ

по мониторингу воздушных линий (ВЛ) с использованием БЛА необходимо учитывать габаритные размеры элементов самой ЛЭП, а также характеристики создаваемого ею ЭМП для задания минимального безопасной траектории полета БЛА.

В качестве исходных данных для расчета минимального расстояния от БЛА до ЛЭП могут быть использованы такие параметры ЛЭП как:

- класс напряжения U_ϕ (кВ),
- ток в проводе I_i (А),
- диаметр провода (мм),
- высота подвеса провода h (м),
- количество проводов при наличии расщепленных фаз n ,
- расстояние между проводами D (м),
- пороговые значения напряженностей электрического и магнитного полей E_i (кВ/м) и H_i (А/м).

Геометрические параметры ВЛ зависят от типа опоры, поэтому для каждого участка трассы сети одного и того же класса напряжения высота полета БЛА будет различной.

Определение параметров ЭМП необходимо для построения корректного и безопасного маршрута БЛА вблизи ВЛ. В ряде работ [4-6] характеристики магнитного поля определяются для обеспечения навигации и позиционирования БЛА. Так как индукция магнитного поля прямо пропорциональна току I , протекающему в проводнике, и обратно пропорциональна расстоянию от точки расчета до проводника

$$r: B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r},$$

авторы работы предлагают

использовать магнитный датчик для расчета расстояния от провода ЛЭП до БЛА r [4]. Кроме того, используя три магнитных датчика, можно определить координаты провода ВЛ в подвижной системе отсчета, начало координат которой совпадает с центром масс БЛА. Тестирование предложенного способа в лабораторных условиях проводилось с использованием кабеля длиной 15 м и двух трансформаторов для регулировки величины тока от 0 до 23 А. При использовании двух магнитных датчиков точность определения координат составила 86%, при тестировании трех датчиков это значение возросло до 97%. Несмотря на высокую эффективность, разработанный

способ имеет ограниченное применение, так как рассчитан на работу с одним проводом. Для эксплуатации в реальных условиях с трехфазной одноцепной ВЛ число датчиков должно быть увеличено до 6. Расстояние до провода ВЛ вычисляется при помощи решения уравнения Био-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}.$$

При анализе магнитного поля

авторы работ [4-6] не учитывали необходимость расчета минимального расстояния от БЛА до провода для безопасной работы бортовой аппаратуры.

Построение маршрута БЛА является одной из важнейших задач при инспектировании ЛЭП. В [7] предложено три типа траектории полета БЛА относительно ЛЭП: по прямой линии, с поворотами в одну сторону и с поворотами в обе стороны. Последний сценарий полета с возможностью поворота влево и вправо является комбинацией первых двух типов маршрутов. Необходимость поворота летательного аппарата может быть обусловлена сменой типов опоры: переходом между анкерными, промежуточными и угловыми опорами. Выбор траектории движения осуществляется с учетом требования минимуму потребляемой энергии и максимуму времени работы летательного аппарата:

$$E_{UAV} = \int_i^n U I dt \rightarrow \min,$$

$t_{UAV} = f(E_{UAV}, P) \rightarrow \max$ [8]. Однако для инспектирования ВЛ недостаточно совершать пролет только справа или слева от трассы распределительной линии, поскольку это сильно ограничивает информативность способа мониторинга ВЛ.

Планирование пути движения БЛА при проведении мониторинга ВЛ с учетом максимального времени полета, качества изображения и площади обзора камеры показано в [9]. Область полета летательного аппарата ограничена кубом, координаты точек которого (Φ) должны находиться в пределах прямой видимости датчиков технического зрения БЛА. Кроме того, в области полета не должны находиться высокие деревья. Для учета возможности механического повреждения БЛА об элементы опоры дополнительно определяются координаты крайних точек опоры Φ_N . Тогда итоговая безопасная область полета летательного аппарата определяется множеством значений

координат $\Phi_S = \Phi - \Phi_N$. Однако для учета влияния электромагнитного поля данная область должна быть уменьшена на величину Φ_{EMS} , которая представляет собой множество координат точек, удовлетворяющих условию: $E_i \leq \overline{E_i} \wedge H_i \leq \overline{H_i}, i = \overline{1, n}$, n — общее число точек рабочего пространства БЛА. Так как ЭМП провода ВЛ распространяется за пределы Φ_N , то есть $\Phi_N < \Phi_{EMS}$, область полета БЛА должна быть рассчитана по формуле: $\Phi_S = \Phi - \Phi_{EMS}$.

В [10] при построении маршрута полета БЛА для проведения мониторинга ЛЭП используются следующие ограничения: минимальное расстояние по вертикальной оси от летательного аппарата до опоры L_{\min} , максимальное значение рыскания $\Delta\phi_{\max}$, максимальная скорость полета $R = L \cdot \tan(\alpha/2)$ (α — угол поля зрения бортовой камеры), обусловленная экономией топлива. Авторы учитывают только возможность крушения БЛА вследствие столкновения с конструкцией опоры, но не учитывают напряженности электрического и магнитных полей E_i и H_i в каждой i -ой точке маршрута. Данное расстояние должно быть увеличено за счет определения карты распределения ЭМП $E(y, z), H(y, z)$.

При полете летательного аппарата на малом расстоянии от провода ВЛ возникает риск крушения по причине механических повреждений и выхода из строя бортовых устройств. Поэтому для безопасной работы БЛА необходимо задать минимально допустимые расстояния от аппарата до провода ВЛ по двум осям z_{\min}, y_{\min} , которые удовлетворяют условиям $E_i \leq \overline{E_i} \wedge H_i \leq \overline{H_i}, i = \overline{1, n}$. Расчет аналогичной величины по третьей координате x_{\min} не требуется, так как предполагается, что трасса ВЛ расположена на оси x , и величина x_i всегда будет превышать предельное значение. То есть при движении вдоль ВЛ характеристики ЭМП практически не меняются: $\forall x_i \in X_r, i = \overline{1, n}, E_i = const, H_i = const$. В [11] описаны две возможные причины крушения БЛА: из-за удара об элементы конструкции опоры и из-за столкновения с электрическими элементами ЛЭП. Для обеспечения безопасной работы БЛА авторы предлагают ввести ограничивающую зону, в которой

будет локализована область полета, причем, данная зона будет иметь форму параллелепипеда с центром в точке с координатами C . Габариты параллелепипеда: высота $H_c = C + H_i + D_s$, длина $L_c = L_i + D_s \cdot 2$ и ширина $W_c = W_i + D_s \cdot 2$ — соответствуют высоте опоры H_i , длине L_i и ширине W_i ее основания с некоторым запасом D_s .

Минимальное расстояние от БЛА до элементов ВЛ L_{\min} также может определяться требованиями к получаемому камерой изображению для обеспечения высокой эффективности последующей обработки изображения. При построении маршрута полета БЛА авторы работы [12] стремились обеспечить работу БЛА в условиях максимальной близости аппарата к проводам для обеспечения четкости изображений: $L \rightarrow L_{\min} : L^2 - 4LF \geq 0$ (F — фокусное расстояние объектива камеры). Подобный подход учитывает только риск крушения БЛА по причине механических повреждений и не учитывает влияние ЭМП на работу электротехнического оборудования БЛА.

Одним из важных конструктивных параметров, характеризующих состояние провода ЛЭП, является стрела провеса провода. Стрела провеса провода, как и длина промежуточного пролета и габариты ВЛ, может быть рассчитана при помощи метода реконструкции проводов ЛЭП на основе данных лидара [13, 14]. В этом случае, описанном в [15, 16], датчик устанавливается на роботе, который передвигается по проводам [17]. Данный метод предполагает вычисление локальной плотности облака точек и анализ трехмерных фигур: распознавание линейных, плоских, сферических и прочих сегментов. Использование роботов, передвигающихся по проводам, в качестве носителя для измерительно-вычислительного оснащения делает необходимым расчет дополнительной стрелы провеса, возникающей вследствие добавочной механической нагрузки на провод: $\delta(x) = \frac{\eta x(L-x)W}{\sigma_0 LS}$, где S — площадь поперечного сечения провода, W — масса робота, L — длина пролета ВЛ, σ_0 — горизонтальные нагрузки напряжения, η — коэффициент, учитывающий влияние ветровых нагрузок. Вычисление данной величины способно внести дополнительную

ошибку при вычислении стрелы провеса. В настоящей работе предлагается использовать БЛА в качестве носителя для измерительно-вычислительной аппаратуры, а также методику расчета стрелы провеса на основе изображений, полученных бортовой камерой, что избавляет от необходимости монтажа дополнительного датчика (лидара) на летательный аппарат.

Система мониторинга ЛЭП помимо характеристик ЭМП должна учитывать конструктивные особенности ВЛ для распознавания элементов ЛЭП на изображении, полученном при помощи бортовой камеры. Так, например, точность определения стрелы провеса может снижаться из-за некорректного распознавания провода на изображении. Для определения стрелы провеса необходимо проводить фото- и видеосъемку сбоку трассы ВЛ, тогда как большинство способов рассчитаны на аэросъемку сверху провода [18-20].

Подход к определению стрелы провеса по изображению, полученному при съемке провода сбоку, на основе преобразований Хафа [21] также имеет недостатки. При пересечении на изображении двух проводов предложенный способ детектирует только один провод, что приводит к дополнительной ошибке при вычислении стрелы провеса.

Данный недостаток можно исправить при помощи корректировки положения БЛА относительно провода, таким образом исключив такие точки съемки, при которых метод дает сбой. Поэтому при разработке методов определения конструктивных параметров ЛЭП требуется ввести два режима фото- и видеосъемки: сверху и сбоку провода, что повысит универсальность способов и расширит потенциальную область применения. Кроме того, для корректной работы алгоритмов распознавания провода на изображении необходимо корректировать положение БЛА во время аэросъемки.

Таким образом, при решении задач планирования мониторинга ЛЭП при помощи БЛА следует учитывать конструктивные особенности ВЛ для предотвращения возникновения дополнительных ошибок оценки контролируемых параметров. Для этого при построении маршрута полета БЛА необходимо определить минимальное допустимое расстояние от аппарата до провода, исходя из условия безопасной

работы бортовой аппаратуры, а также корректировать положение БЛА относительно провода. Поэтому целью данной работы является создание способа мониторинга воздушных линий электропередачи, учитывающего конструктивные особенности ВЛ и негативное влияние электромагнитных полей вблизи распределительных линий на работу бортовых устройств.

I. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПОЛЕТА БЛА И ПРОВЕДЕНИЯ ФОТО- И ВИДЕОСЪЕМКИ

Для выполнения задач мониторинга был разработан алгоритм проведения аэросъемки (рис. 1). Для корректной работы алгоритма оператору необходимо ввести геометрические и электрические параметры ЛЭП и обозначить примерный маршрут полета БЛА для проведения инспектирования состояния Элементов ВЛ. Множества координат точек базового маршрута обозначены X_r, Y_r, Z_r , координаты точки взлета — $(x_0, y_0, 0)$.

Предполагается, что для решения полетных задач оператор определяет ключевые точки полета, и после этого задача выполняется без участия человека. В качестве входных данных алгоритма используются базовый маршрут полета X_r, Y_r, Z_r и точка взлета БЛА $(x_0, y_0, 0)$, которые задаются вручную сотрудниками оперативно-выездной бригады, а также электрические и геометрические параметры ЛЭП: U_ϕ, I_i, D, h .

Далее по входным данным проводится расчет минимальных расстояний от БЛА до провода ЛЭП по двум осям $\Delta z_{\min}, \Delta y_{\min}$ для обеспечения безопасной работы бортового электротехнического оборудования (рис. 2). Расчет минимального допустимого расстояния по третьей координате не требуется, так как предполагается, что опоры ВЛ расположены на оси x и карта распределения электромагнитного поля изменяется незначительно. Исключение может составлять только резкие повороты трассы распределительной линии. Предложенное допущение приводит к тому, что величина x_{\min} всегда будет превышать предельное допустимое значение.

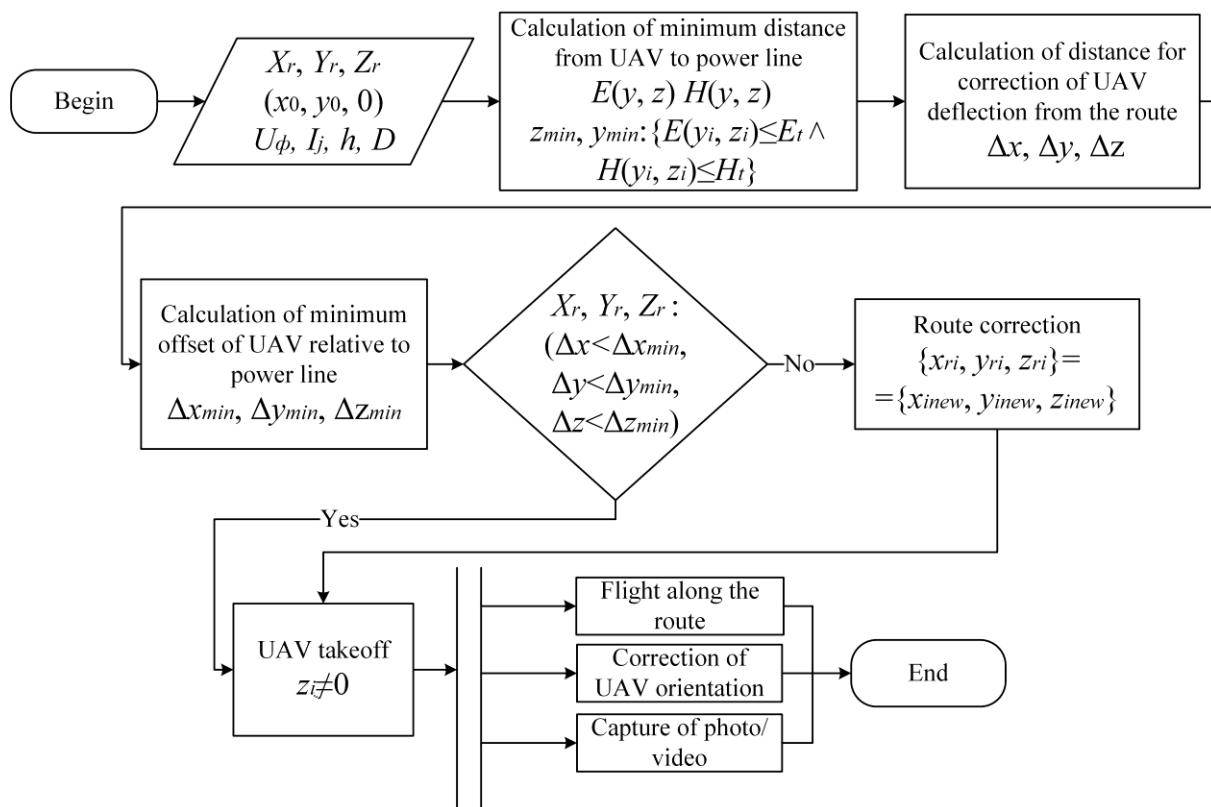


Рис. 1. Блок-схема алгоритма проведения фото/видеосъемки ЛЭП при помощи БЛА. ¹

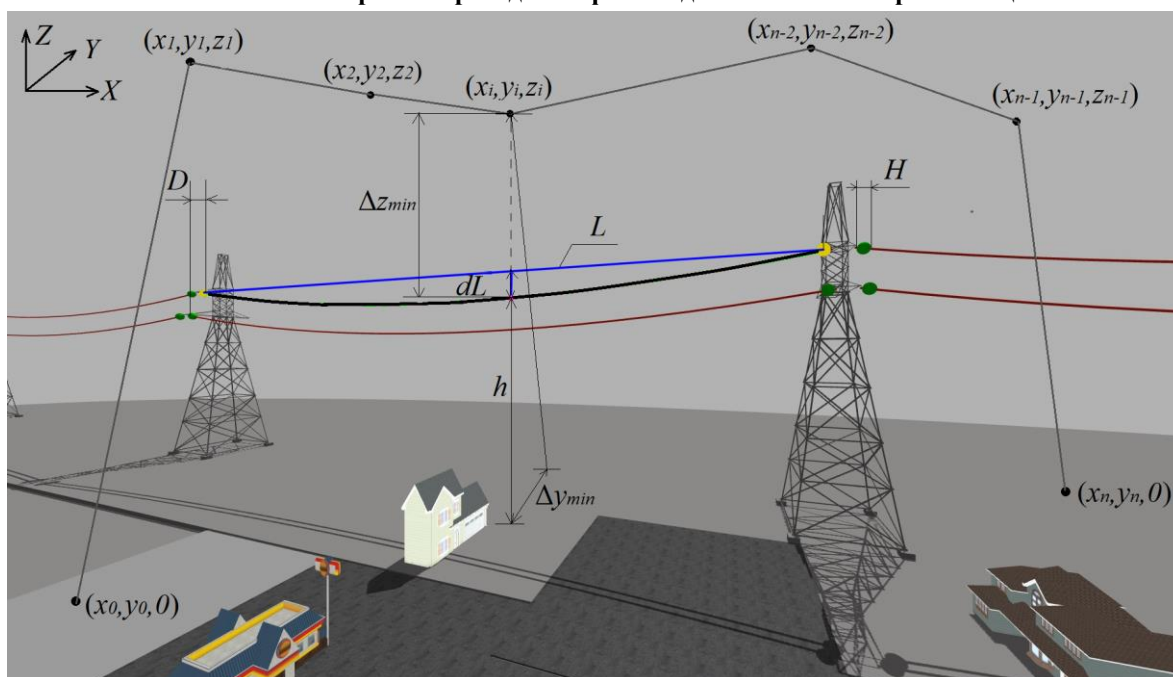


Рис. 2. Визуализация алгоритма мониторинга ЛЭП при помощи БЛА. ²

Для определения допустимой высоты полета БЛА, отвечающей требованиям помехоустойчивости выбранных электронных устройств, необходимо провести расчет распределения ЭМП вблизи ВЛ.

Для определения карты распределения напряженности электрического поля (ЭП) вблизи провода ЛЭП по осям Y и Z может быть использован метод зеркальных изображений [22]:

$$E = \frac{U_{\phi}}{\alpha_{11} - \alpha_{12}} \left\{ \begin{array}{l} - \left[\frac{h+z}{(h+z)^2 + (D+y)^2} + \frac{h-z}{(H-z)^2 + (D+y)^2} \right] + \\ + (0,5 + j0,87) \left[\frac{h+z}{(h+z)^2 + y^2} + \frac{h-z}{(h-z)^2 + y^2} \right] + \\ + (0,5 - j0,87) \left[\frac{H+z}{(h+z)^2 + (h+y)^2} + \frac{H-z}{(h-z)^2 + (D+y)^2} \right] \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где α_{11}, α_{12} — взаимные потенциальные коэффициенты:

$$\alpha_{ij} = \frac{D_{i-i}}{D_{i-j}}, \quad (2)$$

$$\alpha_{12} = \frac{(\alpha_{11} + \alpha_{23} + \alpha_{13})}{3},$$

где D_{j-j} — расстояние между проводником i и его зеркальным изображением, D_{j-k} — расстояние между проводниками j и k .

Напряженность МП зависит от тока нагрузки и может быть определена при помощи интеграла уравнения Био-Савара-Лапласа:

$$H_j = \frac{I_j}{4\pi R} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (3)$$

где ток в i -ом проводе $I_j = Ie^{j\omega t}$ ($\psi = [0^\circ, 120^\circ, 240^\circ]$), углы α_1 и α_2 выражаются через прямоугольные координаты Y и Z (рис. 3):

$$\alpha_1 = \text{arctg} \frac{z}{y}, \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \text{arctg} \frac{z}{l-y}.$$

Помимо минимального расстояния также необходимо учитывать расстояние, которое потребуется для корректировки положения БЛА при различных погодных условиях и учета погрешностей сенсоров при движении по заданному маршруту. Например, летательный аппарат может быть сильно отклонен порывами ветра относительно маршрута, что в совокупности с погрешностью определения местоположения в пространстве приведет к превышению минимально допустимого расстояния до ЛЭП ($\Delta x_{\min}, \Delta y_{\min}, \Delta z_{\min}$) и, как следствие, к выходу БЛА из строя.

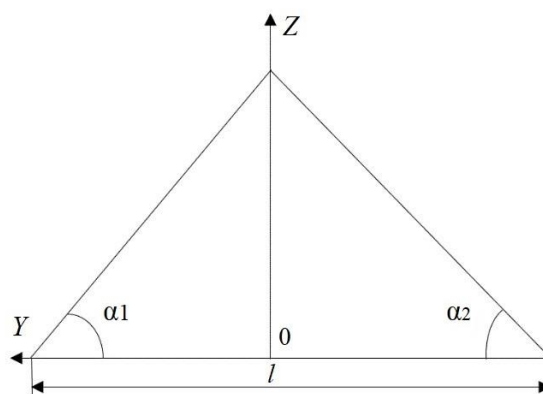


Рис. 3. Расчетная схема для определения напряженности МП прямого провода конечной длины.³

С учетом вышеизложенных особенностей в алгоритме мониторинга ЛЭП происходит расчет минимального смещения БЛА относительно ЛЭП по всем осям ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$). Далее на основе произведенного расчета выполняется проверка маршрута полета на соответствие минимальному смещению. Если маршрут не удовлетворяет минимальному смещению, то осуществляется корректировка маршрута. После того, как маршрут станет соответствовать условиям полета, произойдет взлет БЛА. В ходе выполнения полетных задач происходит фото- и видеофиксация данных в определенных контрольных точках или на всем протяжении маршрута. Одновременно с этим происходит корректировка положения БЛА в пространстве, которая обеспечивает не только стабилизацию аппарата, но и удержание в поле обзора исследуемых объектов.

Задачи мониторинга ЛЭП условно можно разделить на две категории: 1) выявление изменения геометрических параметров проводов и 2) детектирование нарушений целостности высоковольтного оборудования. К первому классу задач относится определение стрел провеса и габаритов ВЛ (расстояний по вертикали от проводов ВЛ до

³ Appendix 1

земли), расстояний до пересекаемых объектов, расстояний между проводами различных фаз и сравнение данных величин с допустимыми значениями. Решение задач второго типа направлено на выявление коррозии проводов, тросов, элементов конструкции опоры и изоляторов, неисправностей в креплениях и соединениях проводов и тросов, а также детектирование

дефектных изоляторов и обгоревших, расщепленных элементов опор.

Для решения задач обеих категорий необходимо установить ключевые точки съемки над и с одной из сторон ЛЭП параллельно проводу. Алгоритм проведения фото/видеосъемки с учетом следования по заданному маршруту показан на рис. 3.

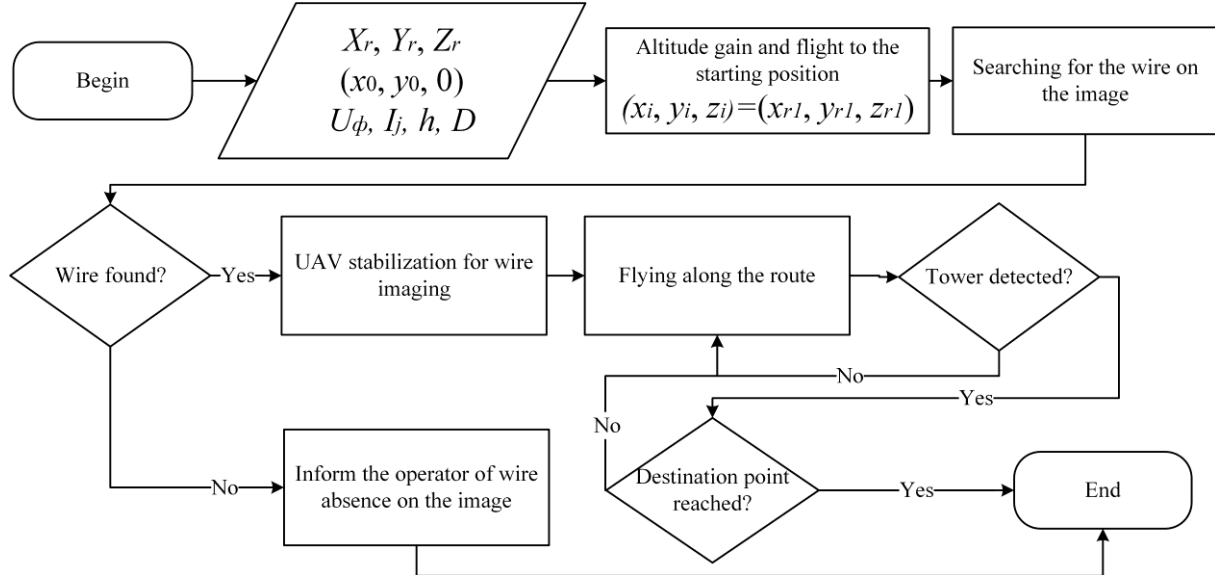


Рис. 4. Блок-схема алгоритма проведения фото/видеосъемки при движении БЛА по заданному маршруту. ⁴

На первом этапе алгоритма БЛА набирает рабочую высоту полета и выходит на стартовую позицию для осуществления мониторинга. Далее выполняется поиск провода на изображении, получаемом с камеры БЛА.

После этого на изображении детектируется провод ВЛ, что позволяет скорректировать положение БЛА таким образом, чтобы провод располагался по центру изображения. При боковой съемке провода БЛА фиксирует положение камеры по центру между крайней нижней и крайней верхней точкой провода.

В случае если провод не был обнаружен на снимке, оператор получит уведомление об этом для того, чтобы он мог принимать дальнейшие решения.

До тех пор, пока БЛА следует по маршруту, и опора ЛЭП не детектирована, БЛА продолжает фото- и видеосъемку, и перемещение по заданной траектории. В случае, если опора детектирована, и конечная точка маршрута достигнута, алгоритм завершается.

II. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРЕЛЫ ПРОВЕСА ПРОВОДА ВЛ

Стрелой провеса провода называется расстояние по вертикали от нижней точки провисания провода в полете до прямой линии между точками крепления провода на опорах. При разработке алгоритма, предназначенного для определения стрелы провеса провода ВЛ, задача сводится к поиску максимального расстояния между нижней точкой кривой провисания провода и прямой, соединяющей точки его крепления (рис. 4). Для достижения данной цели необходимо подать на вход алгоритма серию фотоизображений ЛЭП. После получения фотоснимков программа выполняет их объединение с целью получения единого изображения, целиком охватывающего интересующий участок ЛЭП, который включает в себя две стойки опоры и натянутый между ними провод. Затем для определения прямой, отклонение от которой необходимо найти, производится детектирование двух точек крепления

провода к опоре. Таким образом алгоритм получает координаты точек этих креплений. Далее выполняются поиск точек кривой провода, после чего рассчитывается величина стрелы провеса в пикселях. На следующем шаге алгоритма с помощью известного соотношения между фокусным расстоянием камеры, реальными размерами элементов

крепления (линейной арматурой, спиральных зажимов, вязок и т.д.) и размерами элементов креплений на изображении, выполняется преобразование величины стрелы провеса из пикселей изображения в метры с последующим предоставлением результата пользователю.

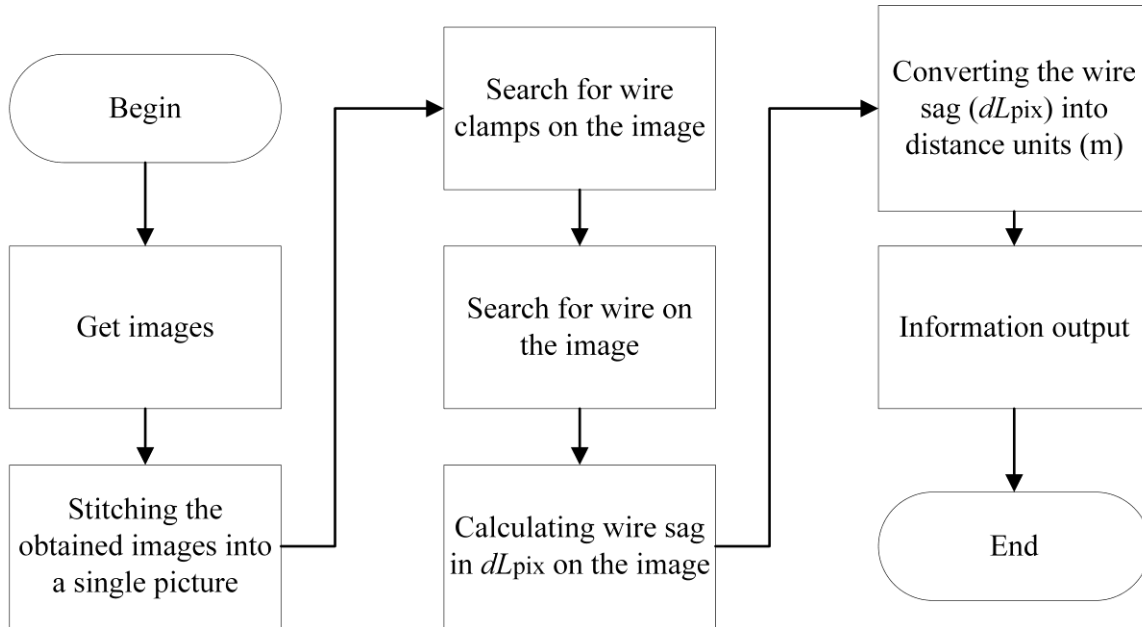


Рис. 5. Блок-схема алгоритма определения стрелы провеса провода. ⁵

При определении величины стрелы провеса провода в пикселях координаты двух креплений провода на изображении будут представлены в виде: $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$. Тогда координаты центра горизонтального отрезка, соединяющего точки узлов креплений, будут определяться выражениями:

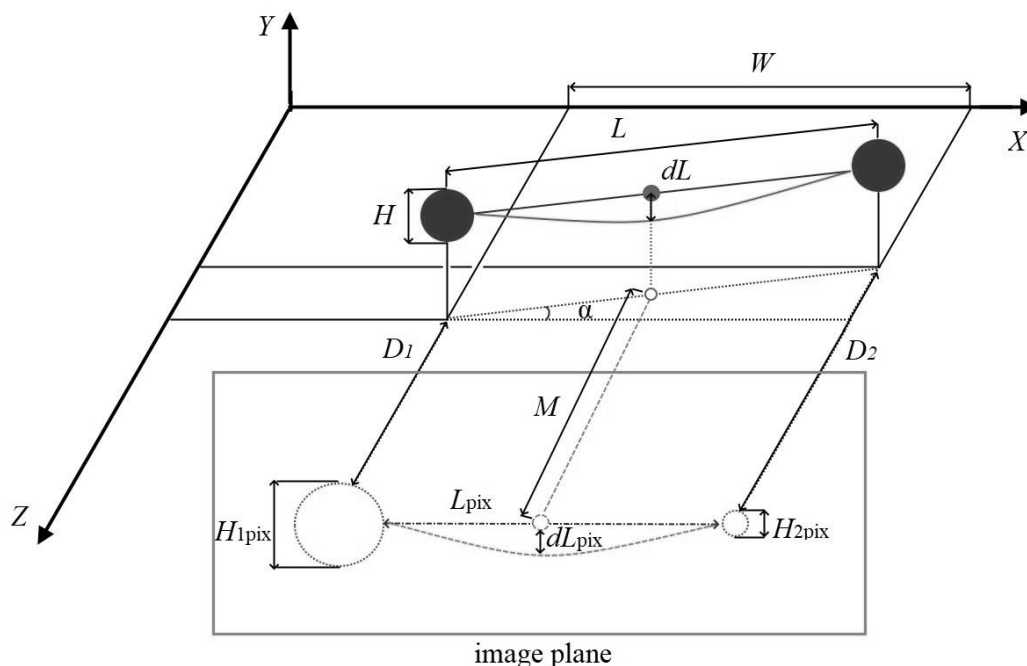
$$x = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad y = \frac{y_1 + y_2}{2}. \quad (5)$$

Точка максимального провеса провода будет располагаться под точкой с координатами (x, y) . На вход алгоритма поступает бинарное изображение, пиксели которого могут иметь значения 1 (черный) и 0 (белый). Предположим, что пиксели провода на изображении имеют цвет (1), отличный от цвета остальных пикселей изображения. Тогда искомому значению ординаты присваивается текущая величина: $y_{иск}=y$ и инкремент выполняется до тех пор, пока цвет пикселя с координатами $y_{иск} = y$ не

будет равен 1. В этом случае величина стрелы провеса в пикселях будет рассчитываться как: $dLpix = y_{иск} - y$.

На рис. 5 схематически показано расположение элементов ВЛ (узлов креплений и провода) и их геометрические размеры. Кругами обозначены узлы крепления провода ВЛ, сплошной линией длиной L — отрезок, их соединяющий. Середина соединяющего отрезка отмечена точкой. Плоскость изображения, в которой расположены проекции представленных элементов конструкции ЛЭП, ограничена прямоугольником.

На данной плоскости красными штриховыми линиями обозначены проекции узлов креплений. Различные диаметры окружностей проекций обусловлен неодинаковым расстоянием между фокальной плоскостью камеры и физическим объектом. Аналогично показаны проекции точки середины соединяющего отрезка (штриховые линии).



W — расстояние между узлами крепления по оси абсцисс X ; L — расстояние между узлами крепления в плоскости XY ; D_1, D_2 — расстояния между фокальной плоскостью камеры и первым и вторым креплениями провода соответственно, H — размер узла крепления провода; H_{1pix}, H_{2pix} — размеры креплений провода в пространстве изображения; dL — стрела провеса провода; dL_{pix} — стрела провеса провода в пространстве изображения; L_{pix} — расстояние между узлами крепления в пространстве изображения; M — расстояние между фокальной плоскостью и середины отрезка, соединяющего узлы крепления провода; α — угол между проекцией соединяющего отрезка L и прямой, параллельной оси X .⁶

Рис. 6. Визуализация исходных данных алгоритма определения стрелы провеса провода.⁷

Формула определения расстояния от объектива камеры до объекта на изображении имеет вид:

$$D = \frac{W \cdot F}{W_{pix}}, \quad (6)$$

где W — реальный размер объекта [м], W_{pix} — размер объекта на изображении [pix], F — фокусное расстояние камеры.

Тогда:

— расстояние от объектива камеры до креплений провода:

$$D_1 = \frac{H_1 \cdot F}{H_{1pix}}, \quad D_2 = \frac{H_2 \cdot F}{H_{2pix}}, \quad (7)$$

— расстояние между креплениями по оси X :

$$W = \frac{D_1 \cdot L_{pix}}{F}, \quad (8)$$

— расстояние между креплениями в плоскости XY :

$$L = \sqrt{W^2 + (D_2 - D_1)^2}, \quad (9)$$

— синус угла между проекцией соединяющего отрезка L и прямой, параллельной оси X :

$$\sin \alpha = \frac{D_2 - D_1}{L} = \frac{M - D_1}{L/2}, \quad (10)$$

— расстояние между фокальной плоскостью и центром прямой, соединяющей крепления провода:

$$M = \frac{D_1 + D_2}{2}. \quad (11)$$

В результате, величина стрелы провеса провода будет определяться выражением:

$$dL = \frac{M \cdot dL_{pix}}{F}. \quad (12)$$

Величина стрелы провеса провода зависит от длины пролета, сечения и материала (марки) провода, расстояний между проводами, а также от температуры воздуха в момент их натяжения и района по гололеду. Таким образом, зная длину пролета ВЛ и условия эксплуатации линии, можно определить предельное значение стрелы провеса для проводов различных классов напряжения.

III. ТЕСТИРОВАНИЕ

Для проверки работоспособности разработанной методики определения стрелы провеса при помощи 3D симулятора Gazebo

был смоделирован пролет одноцепной ВЛ (рис. 2). Были проведены три серии экспериментов с различными фактическими значениями стрелы провеса: 2,8, 3,5 и 4,4 м. В общей сложности было получено 30 изображений, снятых с различных ракурсов. 6 из этих изображений содержали только по одному проводу, поэтому далее при анализе не рассматривались. Для симуляции процесса детектирования исследуемые объекты (провода, узлы креплений провода к опоре ЛЭП) были окрашены в яркий цвет для возможности использования фильтра соответствующего цвета.

Такая обработка изображений, как показана на рис. 2 позволяет осуществить распознавание контуров объектов и с помощью представленной методики найти размеры узлов креплений проводов и величину стрелы провеса провода. Рассчитанные значения стрелы провеса верхнего и нижнего проводов приведены на рис. 7.

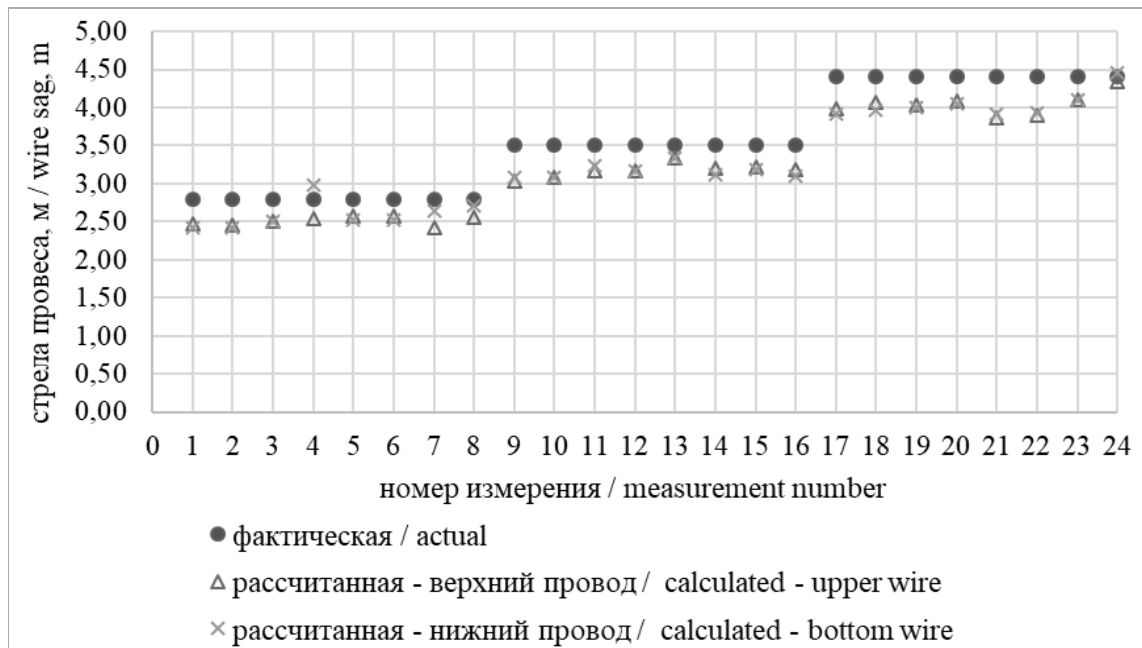


Рис. 7. Значения стрелы провеса для верхнего и нижнего проводов. ⁸

Максимальное значение ошибки определения стрелы провеса достигло 0,53 м, что составило 12% от истинного значения величины. В соответствии с полученным графиком, большинство рассчитанных значений лежат ниже фактических, так как для возможности распознавания на изображении диаметр провода был увеличен. Для оценки эффективности методики на

основе полученных данных были рассчитаны абсолютные и относительные ошибки и СКО (табл. 1).

Значения ошибок для нижнего и верхнего проводов отличаются менее, чем на 5%, что обеспечивает возможность определения стрел провеса двух проводов по одному изображению. Предложенная методика обеспечивает малый разброс рассчитанных

значений при фотосъемке ВЛ с различных ракурсов и имеет высокую точность расчета 90,22%.

Таблица 1⁹.

Значения ошибок определения стрел провеса для верхнего и нижнего¹⁰.

Фактическая стрела провеса, м / Actual wire sag, m	2,8	3,5	4,4
Верхний провод / Upper wire			
Среднее значение стрелы провеса, м / Average wire sag value, m	2,51	3,18	4,05
Абсолютная ошибка, м / Absolute error, m	0,29	0,32	0,35
Относительная ошибка / Relative error, %	10,27	9,21	8,01
СКО, м / SD, m	0,02	0,06	0,15
Нижний провод / Bottom wire			
Среднее значение стрелы провеса, м / Average wire sag value, m	2,59	3,17	4,04
Абсолютная ошибка, м / Absolute error, m	0,21	0,33	0,36
Относительная ошибка / Relative error, %	13,57	9,54	8,10
СКО, м / SD, m	0,25	0,05	0,23
Точность определения стрелы провеса / Wire sag calculation accuracy, %	90,22		

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается актуальная проблема мониторинга высоковольтных ЛЭП. Проведен обзор и сравнительный анализ современных решений задачи оценки состояния элементов ВЛ на основе робототехнических платформ. Несмотря на то, что некоторые представленные исследования направлены на расчет характеристик магнитного поля при помощи бортовых датчиков БЛА, авторы рассмотренных работ не учитывают влияние электромагнитного поля на работу бортовой аппаратуры. Кроме того, авторы других статей не рассматривают влияния положения БЛА относительно провода ВЛ на точность расчета конструктивных параметров.

Авторами предложены алгоритмы проведения фото- и видеосъемки во время полета БЛА, которые учитывают следование БЛА по заранее заданному оператором маршруту, минимальное отклонение от маршрута и минимальную высоту полета. Минимально допустимая высота полета БЛА определяется предельными значениями напряженностей магнитного и электрического полей. Показана методика расчета распределения ЭМП вблизи ЛЭП.

В качестве основного геометрического параметра, по которому проводится оценка состояния провода ВЛ, была выбрана стрела провеса. В процессе проведения

исследования был разработан алгоритм определения данного параметра, использующий в качестве исходных данных бинарное изображение, которое состоит из пикселей двух значений: 1 и 0. Пиксели черного цвета (1) относятся к детектированным элементам ВЛ, белого цвета (0) — к фону. На выходе алгоритма пользователь получает величину стрелы провеса, выраженную в метрах. Оценка полученного параметра осуществляется с учетом допустимых значений стрелы провеса и отклонения от контрольных значений. Разработанная методика определения стрелы провеса был протестирован при помощи симулятора Gazebo для трех фактических значений стрелы провеса. Данная методика может быть использован для определения стрелы провеса нескольких проводов по одному изображению и имеет точность 90,22%.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Flowchart of photo- and video-imaging of overhead power lines using UAV.

²Fig. 2. Visualization of the power lines monitoring algorithm for using UAVs

³Fig. 3. Calculation scheme for magnetic field intensity of finite-length wire.

⁴Fig. 4. Calculation scheme for magnetic field intensity of finite-length wire.

⁵Fig. 5. Flowchart of wire sag calculation.

⁶ W — distance between clamps on the X axis; L — distance between clamps in the XY plane; D_1, D_2 —

distances between the camera focal plane and the first and the second clamps of the wire respectively, H — wire clamp size; H_{1pix}, H_{2pix} — wire clamp sizes in the image space; dL — wire sag; dL_{pix} — wire sag in the image space; L_{pix} — distance between clamps in the image space; M — distance between the focal plane and the midpoint of the segment, connecting the wire clamps; α — angle between the projection of the connecting segment L and the straight line, parallel to the X axis.

⁷**Fig. 6.** Overhead line span model in Gazebo simulation environment.

⁸**Fig. 7.** Wire sag values for the upper and for the bottom wire.

^{9,10}**Table 1.** Error values in wire sag definition for the upper and for the bottom wire.

Литература (References)

- [1] Liu Q., He M., Xu D., Ding N., Wang, Y. A Mechanism for Recognizing and Suppressing the Emergent Behavior of UAV Swarm. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. vol. 2018. pp. doi: 1-14. 10.1155/2018/6734923
- [2] Wild G., Murray J., Baxter, G. Exploring civil drone accidents and incidents to help prevent potential air disasters. *Aerospace*. vol. 3. no. 3. pp. 1-11. doi: 10.3390/aerospace3030022
- [3] Chermoshencev S.F., Gaynutdinov, R.R. Modeling the external electromagnetic influences on the complex electronic equipment. *2015 XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*. 2015. pp. 90-92. doi: 10.1109/SCM.2015.7190420
- [4] Rosner D., Trifu C., Tranca C., Vasilescu I., Stancu F. Magnetic Field Sensor for UAV Power Line Acquisition and Tracking. 2018 17th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet). 2018. pp. 1-5. doi: 10.1109/EI2.2018.8582405
- [5] Wu Y., Zhao G., Hu J., Ouyang Y., Wang S.X., He J., Wang, S. Overhead Transmission Line Parameter Reconstruction for UAV Inspection Based on Tunneling Magneto-resistive Sensors and Inverse Models. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019. vol. 34. no. 3. pp.819-827. doi: 10.1109/TPWRD.2019.2891119
- [6] Zhang Y., Yuan X., Li W., Chen S. Automatic power line inspection using UAV images. *Remote Sensing*. 2017. vol. 9. no. 8. pp. 824. doi: 10.3390/rs9080824
- [7] Strupka G., Rankis I. Investigation of Unmanned Aerial Vehicle Routes to Fulfill Power Line Management Tasks. *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. 2018. pp. 55-63. doi: 10.1007/978-3-319-94346-6_6
- [8] Strupk G., Levchenkov A., Gorobetz, M. Fuzzy-logic algorithm of UAV hardware configuration assessment for flight time and lift capacity improvements. *2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. 2017. pp. 1-5. doi: 10.1109/RTUCON.2017.8124787
- [9] Baik H., Valenzuela J. Unmanned Aircraft System Path Planning for Visually Inspecting Electric Transmission Towers. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2019. vol. 95. no. 3-4. pp. 1097-1111. doi: 10.1007/s10846-018-0947-9
- [10] Cui J., Zhang Y., Ma S., Yi Y., Xin J., Liu D. Path planning algorithms for power transmission line inspection using unmanned aerial vehicles. *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. 2017. pp. 2304-2309. doi: 10.1109/CCDC.2017.7978899
- [11] He T., Zeng Y., Hu Z. Research of Multi-Rotor UAVs Detailed Autonomous Inspection Technology of Transmission Lines Based on Route Planning. *IEEE Access*. 2019. vol. 7. pp. 114955-114965. doi:10.1109/ACCESS.2019.2935551
- [12] Huang L., Xu D., Zhai D. Research and Design of Space-Sky-Ground Integrated Transmission Line Inspection Platform Based on Artificial Intelligence. *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. 2018. pp. 1-4. doi:10.1109/EI2.2018.8582405
- [13] Guan H., Yu Y., Li J., Ji Z., Zhang Q. Extraction of power-transmission lines from vehicle-borne lidar data. *International Journal of Remote Sensing*. 2016. vol. 37. no. 1. pp. 229-247. doi: 10.1080/01431161.2015.1125549
- [14] Awrangjeb M. Extraction of Power Line Pylons and Wires Using Airborne LiDAR Data at Different Height Levels. *Remote Sensing*. 2019. vol. 11. no. 15. pp. 1798. doi: 10.3390/rs11151798
- [15] Qin X., Wu G., Lei J., Fan F., Ye X., Mei Q. A novel method of autonomous inspection for transmission line based on cable inspection robot lidar data. *Sensors*. 2018. vol. 18. no. 2. pp. 596. doi: 10.3390/s18020596
- [16] Qin X., Wu G., Ye X., Huang L., Lei, J. A novel method to reconstruct overhead high-voltage power lines using cable inspection robot lidar data. *Remote Sensing*. 2017. vol. no. 7. pp. 753. doi: 10.3390/rs9070753
- [17] Qin X., Wu G., Lei J., Fan F., Ye X. Detecting Inspection Objects of Power Line from Cable Inspection Robot LiDAR Data. *Sensors*. 2018. vol. 18. no. 4. pp. 1284. doi: 10.3390/s18041284
- [18] Koshelev V.I., Kozlov, D.N. Wire recognition in image within aerial inspection application. In *2015 4th Mediterranean Conference on*

- Embedded Computing (MECO)*. 2015. pp. 159-162. doi: 10.1109/MECO.2015.7181891
- [19] Tian F., Wang Y., Zhu L. Power line recognition and tracking method for UAVs inspection. *2015 IEEE International Conference on Information and Automation 2015*. pp. 2136-2141. doi: 10.1109/ICInfA.2015.7279641
- [20] Yetgin Ö.E., Gerek, Ö.N. Automatic recognition of scenes with power line wires in real life aerial images using DCT-based features. *Digital Signal Processing*. 2018. vol. 77. pp. 102-119. doi: 10.1016/j.dsp.2017.10.012
- [21] Baker L., Mills S., Langlotz T., Rathbone C. Power line detection using Hough transform and line tracing techniques. *2016 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ)*. 2016. pp. 1-6. doi: 10.1109/IVCNZ.2016.7804438
- [22] Griffiths D.J. *Introduction To Electrodynamics*. 4th ed/ Cambridge, Cambridge University Press. 2013. p. 121.

Сведения об авторах.



Шабанова Александра Романовна.

Лаборатория технологий больших данных социо-киберфизических систем Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. Сфера научных интересов: алгоритмы управления электро-механических систем в составе БЛА.

E-mail:

iialex.shabanovaii@gmail.com



Лебедев Игорь Владимирович.

Лаборатория технологий больших данных социо-киберфизических систем Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. Сфера научных интересов: техническое зрение, методы распознавания образов, проектирование автоматизированных систем.

E-mail: igorlevedev@gmail.com



Толстой Иван Михайлович.

Лаборатория автономных робототехнических систем Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. Сфера научных интересов: математические методы интеллектуального анализа данных, системы семантического моделирования, визуализации и виртуального окружения

E-mail: tolstoy.i.m@yandex.ru