

Расчет необходимой мощности для функционирования привязной беспилотной платформы в условиях турбулентной атмосферы*

В. М. Вишнеvский, А. М. Ширванян, Н. Н. Бряшко

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. Работа посвящена оценке необходимой мощности, передаваемой на борт привязной высотной беспилотной платформы, в которой электропитание двигательных установок и полезной нагрузки осуществляется от наземного источника энергии по кабель-тросу. Приводится краткий вывод и решение системы дифференциальных уравнений для описания положения кабеля в пространстве и сил его воздействия на высотный беспилотный модуль в турбулентной атмосфере. При расчете мощности учтены сила тяжести летательного аппарата с полезной нагрузкой, воздействие кабеля на беспилотный модуль и сила сопротивления его ветру. Приводятся описание архитектуры системы, состоящей из наземной станции, кабель-троса и летательного аппарата, и результаты полевых испытаний, показавших хорошее совпадение с результатами теоретических исследований.

Ключевые слова: привязная беспилотная телекоммуникационная платформа, система передачи энергии большой мощности, система дифференциальных уравнений, беспилотный летательный аппарат.

DOI 10.14357/20718632200307

Введение

В настоящее время широкое развитие получили высотные телекоммуникационные платформы, реализуемые на автономных беспилотных летательных аппаратах [1, 2]. Основным недостатком автономных беспилотных летающих аппаратов (БПЛА) является ограниченное время функционирования, связанное с малым ресурсом аккумуляторов БПЛА, оснащенных электрическими двигателями или ограниченным запасом топлива для двигателей внутреннего сгорания. В связи с этим такие БПЛА не могут быть эффективно использованы в системах, где требуется длительное время функционирования, например, в системах управления

безопасностью и охраны от террористических угроз критически важных объектов (атомных станций, аэродромов, протяженных мостов, участков границ). Длительное функционирование могут обеспечивать привязные высотные беспилотные платформы, в которых электропитание двигателей и аппаратуры полезной нагрузки осуществляется от наземных источников энергии [3-5]. Возможность передачи энергии большой мощности (10-15 кВт) по кабелю с земли на борт БПЛА позволяет осуществлять подъем и удержание на высотах 100-200м полезной телекоммуникационной нагрузки в течении длительного времени, ограниченного лишь надежностными характеристиками БПЛА [6-9].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №19-29-06043

Привязные высотные платформы занимают промежуточное положение между спутниковыми системами и наземными системами, оборудование которых (базовые станции сотовой связи, радиорелейное и радиолокационное оборудование и т.д.) располагается на высотных сооружениях. По сравнению с дорогостоящими спутниковыми системами, привязные высотные платформы обладают высокой экономичностью, а наземные телекоммуникационные системы превосходят по обширности зон телекоммуникационного и видео покрытия. Учитывая перспективность практического применения привязных беспилотных высотных платформ, как в гражданских, так и в оборонных отраслях, в исследовательских центрах передовых стран мира ведутся интенсивные работы по проектированию и реализации таких платформ.

Следует отметить, что исследованию автономных БПЛА и реализации на их базе широкополосных беспроводных сетей посвящены многочисленные публикации, описанные, например, в обзорах [1, 2]. В тоже время методы проектирования привязных высотных беспилотных платформ, имеющих обширные применения, слабо отражены в современной мировой литературе.

Основными исходными параметрами при проектировании привязных высотных беспилотных платформ являются: взлетный вес беспилотного модуля, включающий вес полезной телекоммуникационной нагрузки; высота подъема и зависания беспилотного модуля; предельная сила ветровых нагрузок, которую способен выдержать БПЛА; время непрерывного функционирования без опускания на землю. В качестве полезной нагрузки может использоваться базовая станция сотовой связи для оперативного создания современной телекоммуникационной инфраструктуры в чрезвычайных условиях; радиорелейная и радиолокационная аппаратура для организации связи на большие расстояния в условиях прямой видимости или радиолокационного покрытия обширной территории; аппаратура видеонаблюдения, экологического мониторинга и т.д.

Расчет необходимой мощности, передаваемой с земли на борт высотного беспилотного модуля в зависимости от перечисленных выше

исходных данных, определяет выбор основных параметров всех компонент привязной высотной платформы. В первую очередь это параметры системы передачи энергии земля-борт, включая способ передачи энергии (постоянный или переменный ток [10, 11]). Величина передаваемой мощности определяет характеристики двигательных установок и архитектуру мультиторного высотного модуля [12], а также выбор параметров и структуру высоковольтного кабель-троса, включающего медные провода, оптоволокно и кевларовую нить [13]. В связи с этим предлагаемые в настоящей статье теоретические и экспериментальные методы исследования привязных беспилотных платформ, функционирующих в турбулентной атмосфере, имеют важное значение при проектировании подобных робототехнических комплексов.

Статья организована следующим образом. В первом разделе описана методология расчета необходимой мощности, передаваемой с земли на борт БПЛА в зависимости от высоты подъема, скорости ветровых нагрузки, взлетного веса высотного беспилотного модуля. Во втором разделе рассмотрена математическая модель функционирования привязной платформы, функционирующей в турбулентной атмосфере и решение системы дифференциальных уравнений для расчета сил, действующих на БПЛА со стороны кабель-троса при ветровых нагрузках. В третьем разделе приводятся результаты расчета необходимой мощности в зависимости от высоты подъема, силы натяжения кабеля и скорости ветра. В четвертом разделе описана архитектура привязной высотной беспилотной платформы «Альбатрос», разработанной под руководством и при участии авторов статьи, и экспериментальные исследования, подтвердившие высокую точность теоретических результатов.

1. Методология расчета необходимой мощности, передаваемой с земли на борт

Рассмотрим БПЛА и действующие на него силы в условиях воздействия ветра.

На Рис. 1 представлены силы, действующие на беспилотных высотный модуль в турбулентной атмосфере: сила тяжести действует с силой

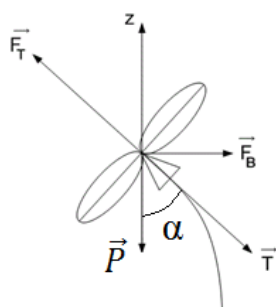


Рис. 1. Силы, действующие на беспилотный летательный аппарат

\vec{P} – взлетный вес БПЛА; сила сопротивления дрона ветру (\vec{F}_B); сила натяжения кабеля (\vec{T}), учитывающая также вес кабеля. Сумма этих сил определяет модуль и вектор необходимой силы тяги двигателей (\vec{F}_T) для создания подъемной силы, удерживающей БПЛА в заданной точке:

$$-\vec{F}_T = \vec{F}_B + \vec{P} + \vec{T}. \quad (1)$$

Модуль необходимой тяги двигателей рассчитывается по следующей формуле:

$$|\vec{F}_T| = \sqrt{(|\vec{P}| + |\vec{T}| \cdot \sin \alpha)^2 + (|\vec{F}_B| + |\vec{T}| \cdot \cos \alpha)^2}, \quad (2)$$

где α – угол наклона силы натяжения к вертикали.

Мощность двигателей после определения модуля результирующей силы можно вычислить по формуле:

$$W = \frac{|\vec{F}_T|}{k \cdot g}, \quad (3)$$

где W – необходимая мощность двигателей для зависания в заданной точке, кВт;

$\frac{|\vec{F}_T|}{g}$ – суммарная тяга двигателей БПЛА, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

k – эффективность винтомоторной группы, характеризующий отношение мощности двигателя к суммарной тяге двигателя, кг/кВт.

Вес \vec{P} определяется взлетным весом, включающим собственный вес БПЛА и вес полезной нагрузки

$$\vec{P} = m_1 \vec{g} + m_2 \vec{g}, \quad (4)$$

где m_1 – собственная масса БПЛА;

m_2 – масса полезной нагрузки.

Силу сопротивления ветру самой платформы (\vec{F}_B) можно рассчитать следующим образом:

$$|\vec{F}_B| = C_x \cdot w \cdot S, \quad (5)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления (безразмерный коэффициент);

w – ветровое давление;

S – площадь поперечного сечения коптера.

Коэффициент C_x и площадь поперечного сечения БПЛА меняют свое значение в зависимости от угла наклона α . Для расчетов примем средние значения: $C_x = 1.5$ и $S = 1 \text{ м}^2$ (оценочная величина площади сечения БПЛА) [14].

Нормальное ветровое давление на препятствие приближенно определяется по формуле [15]:

$$w = 0.5 \cdot \rho \cdot v^2,$$

где ρ – плотность воздуха, зависящая от его влажности, температуры и атмосферного давления (1.18415 кг/м³),

v – скорость ветра, м/с.

Тогда $|\vec{F}_B| \approx 0.9 \cdot v^2$ (6)

Коэффициент эффективности винтомоторной группы k определяется следующим образом.

Из практики реализации БПЛА и выбора винтомоторной группы известно, что достаточно хорошим значением коэффициента эффективности является $k = 10$ кг/кВт и выше. Это означает, что на каждый кВт затраченной энергии можно поднимать 10 кг нагрузки. Значение коэффициента эффективности в значительной мере определяется выбором типа двигателей, диапазона длины и шага пропеллеров, выпускаемых различными производителями.

Для автономных БПЛА при постоянной скорости ветра и весе полезной нагрузки коэффициент эффективности остается постоянным и не зависит от высоты подъема. Для привязной беспилотной платформы с увеличением высоты подъема увеличивается вес нагрузки (за счет увеличения силы натяжения кабеля). И, соответственно, снижается эффективность винтомоторной группы. Для сравнительного анализа роста потребления энергии при увеличении веса нагрузки на Рис. 2 представлен график, иллюстрирующий снижение эффективности восьми моторного высотного беспилотного мо-

дуля, оснащенного двигателями XRotor 8 Series фирмы HobbyWing[16] и пропеллерами 3010.

В данном случае график показывает зависимость требуемой мощности для удержания БПЛА в заданной точке от массы $\left(\frac{\vec{F}_T}{g}\right)$, харак-

теризующей необходимую силу тяги двигателей. То есть, сила тяги, равная сумме веса БПЛА с полезной нагрузкой, силы натяжения кабеля и силы сопротивления БПЛА ветру, показывает какую общую взлетную массу могут поднять двигатели БПЛА.

Для расчета коэффициента k можем построить приближительную функцию исходя из значений на Рис. 2:

$$k = -0.0000235834 \times \left| \frac{\vec{F}_T}{g} \right|^3 + 0.00431624 \times \left| \frac{\vec{F}_T}{g} \right|^2 - 0.32787 \times \left| \frac{\vec{F}_T}{g} \right| + 16.6228 \quad (7)$$

Аналогичные зависимости могут быть получены при использовании винтомоторной группы фирмы T-MOTOR [17] или любой другой фирмы.

Учитывая (1)-(4) необходимую мощность для функционирования БПЛА можно рассчитать следующим образом:

$$W = \frac{\sqrt{(|m_1 \vec{g}| + |m_2 \vec{g}| + |\vec{T}| \cdot \sin \alpha)^2 + (|\vec{F}_e| + |\vec{T}| \cdot \cos \alpha)^2}}{k \cdot g} \quad (8)$$

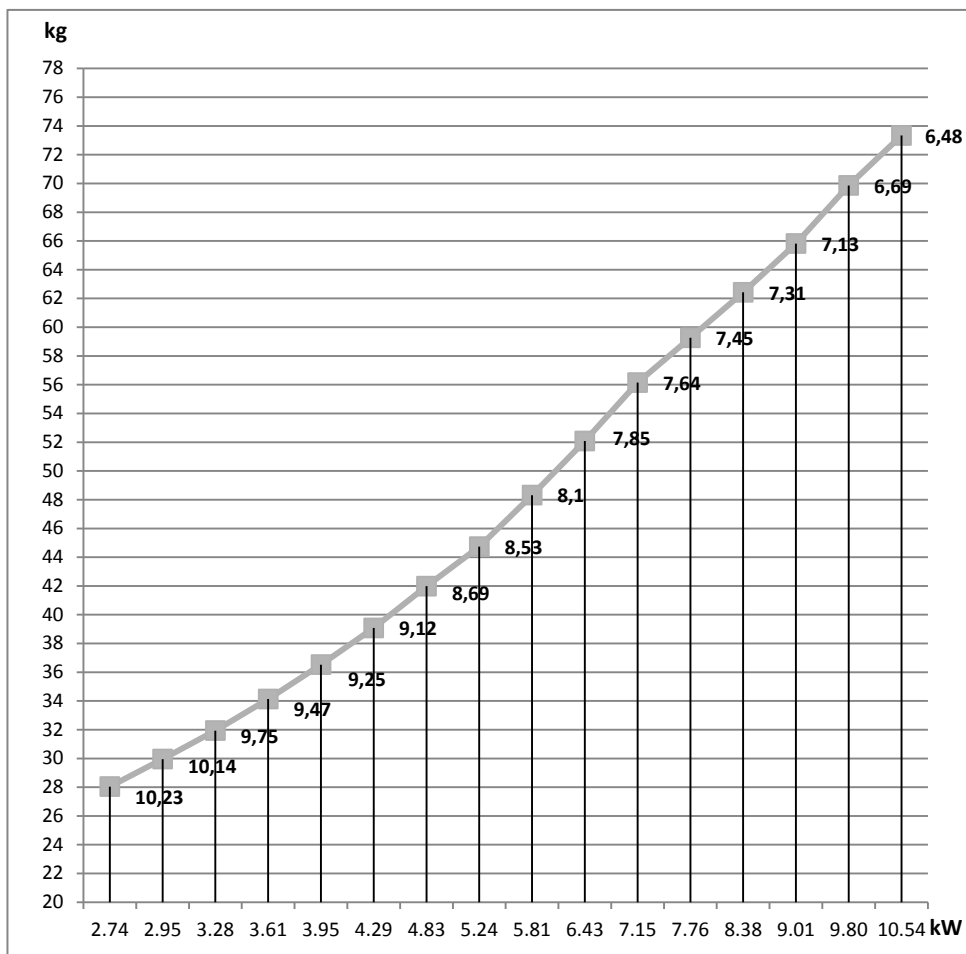


Рис. 2. Эффективность 8 роторного БПЛА с соосным расположением P80III 100kV + MF3218

Таким образом, определены все силы необходимые для расчета мощности, кроме силы натяжения действующей со стороны кабеля на платформу и ее угла наклона. Для её определения необходимо описать математическую модель положения кабеля в пространстве.

2. Математическая модель функционирования кабель-троса в условиях турбулентной атмосферы

Как уже отмечалось, электропитание двигательных установок и телекоммуникационные полезные нагрузки высотного беспилотного модуля осуществляются с земли по кабель-тросу, что обеспечивает возможность длительного функционирования привязной высотной платформы. Кабель-трос, включающий медные провода, оптоволокно и кевларовую нить, является механической, электрической и информационной связью между наземным модулем и высотным беспилотным модулем. Внешний диаметр кабель-троса определяет его аэродинамическое сопротивление ветровому потоку, и тем самым оказывает существенное влияние на характер и величину возмущающего воздействия на беспилотный модуль при различных ветровых нагрузках.

Дифференциальные уравнения равновесия привязи и расчет действующих сил были рассмотрены и ранее для различных привязных объектов. В ряде зарубежных статей рассматриваются различные вариации задачи с привязными БПЛА: контроль натяжения кабеля, следование за движущимся транспортным средством и др. [3, 5-6]. Однако в перечисленных работах не рассматривались вопросы воздействия кабель-троса на беспилотный аппарат при ветровых нагрузках, что оказывает существенное влияние на функционирование привязной беспилотной платформы.

При расчете сил, действующих на БПЛА в турбулентной атмосфере, необходимо учитывать силу тяжести, определяемую весом кабель-троса, взлетным весом БПЛА, и силу ветровой нагрузки.

Рассмотрим беспилотный летательный аппарат, который снабжается электроэнергией, передаваемой по кабелю от наземного пункта

питания. Предполагается, что нижний конец кабеля крепится с помощью лебедки, обеспечивающей постоянное натяжение нижнего конца кабеля T_0 (Рис. 3), а верхний конец шарнирно крепится к платформе. Платформа обеспечивает натяжение кабеля по всей его длине вплоть до лебедки.

Положение кабеля в пространстве будем задавать в прямоугольной системе координат (x, y, z) . Равновесное положение кабеля в системе координат $OXYZ$ задается двумя уравнениями:

$$\begin{cases} x = x(z); \\ y = y(z) \end{cases} \quad (9)$$

где $z \in [0; H]$, H – высота подъема платформы.

Для расчета ветровой нагрузки на кабель предположим, что скорость ветра задается двумя детерминированными проекциями $v_x = v_x(z)$ и $v_y = v_y(z)$ на оси OX и OY соответственно. Проекция скорости ветра на вертикальную ось OZ тождественно равна нулю. Скорость ветра не изменяется во времени. При расчете нагрузки будем учитывать только нормальную по отношению к оси кабеля ветровую нагрузку. Тангенциальную нагрузку будем считать равной нулю.

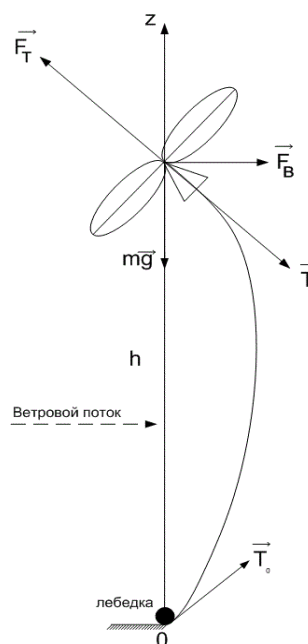


Рис. 3. Схематичное изображение привязной высотной платформы и сил, действующих на нее

Длина кабеля L описывается следующим дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{dL}{dz} = \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2} \quad (10)$$

с начальным условием $L(0)=0$.

Для упрощения расчетов будем предполагать, что направление ветра совпадает с направлением оси X , что позволяет рассматривать положение кабеля в плоскости OXZ . Ранее в работе [18] авторами был представлен подробный вывод системы дифференциальных уравнений положения кабеля в пространстве:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dz} = \rho \cdot g; \\ \frac{dx_2}{dz} = x_3; \\ \frac{dx_3}{dz} = \frac{-\rho \cdot g \cdot x_3 \cdot (1 + x_3^2) - A \cdot v^2 \cdot \sqrt{1 + x_3^2}}{x_1}; \\ \frac{dx_4}{dz} = \sqrt{1 + x_3^2} \end{cases} \quad (11)$$

где z – текущая высота (м) элемента кабеля dx_2 над поверхностью Земли;

x_1 – сила натяжения кабеля (Н);

$\rho = 0.05$ – линейная плотность провода (кг/м);

$g = 9.8$ – ускорение свободного падения (м/с²);

x_2 – отклонение кабеля от вертикали (м);

x_3 – тангенс угла наклона кабеля от вертикали;

$A = 0.003$ – коэффициент аэродинамического сопротивления (кг/м²) [19];

v – скорость ветра (м/с);

x_4 – длина кабеля от лебедки до текущей высоты (м).

Исходя из первого уравнения системы, следует, что сила натяжения кабеля зависит только от высоты подъема коптера и силы натяжения кабеля лебедкой. Решение системы уравнений в зависимости от различных исходных данных позволит найти силу воздействия кабеля на БПЛА и угол наклона кабеля от вертикали – что остаётся последним неизвестным в уравнении (8).

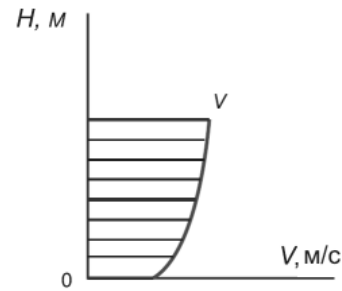


Рис. 4. Профиль скорости вблизи поверхности земли

Сложность рассматриваемой задачи заключается в том, что при ее решении необходимо решать не задачу Коши, а краевую задачу, когда условия задаются при различных значениях аргумента z . В статье [18] приведен вывод системы дифференциальных уравнений, но не разработан алгоритм решения и, соответственно, получения численных результатов. В настоящей работе восполняется этот пробел.

Для расчетов совместим нижний конец кабеля с началом системы координат $OXYZ$. Предположим, что лебедка обеспечивает постоянное натяжение нижнего конца кабеля T_0 . Дрон с помощью системы управления положением удерживается в окрестности точки, расположенной по вертикали на H метров выше нижнего конца кабеля.

Математическая модель, описанная выше позволяет учитывать различную скорость ветра на каждом участке кабель-троса, что допускает учет профиля скорости ветра по всей протяженности кабеля, поэтому скорость ветра в каждой точке будет рассчитываться исходя из задаваемой скорости ветра в точке зависания.

Многочисленные эксперименты по измерению профиля скорости ветра до высот около 200 м показали, что зависимость этой величины от высоты имеет логарифмический вид. Вблизи поверхности земли воздушные потоки тормозятся трением, которое создают неровности подстилающей поверхности. В моделях влияние неоднородности поверхности учитывается путем введения параметра шероховатости, определяемого на основе измерений ветра на разных высотах. С удалением от поверхности Земли эффект трения уменьшается и скорость ветра возрастает.

В работе [20] показано, что в приземном слое профиль ветра с хорошей точностью описывается следующей логарифмической зависимостью:

$$V_1 = V_0 \cdot \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^{kx}$$

где V_1 – скорость ветра на заданной высоте;

V_0 – скорость ветра на известной высоте;

h_1 – заданная высота;

h_0 – высота измерения;

kx – эмпирический показатель шероховатости подстилающей поверхности. Этот коэффициент принимает различное значение для разных ландшафтов и варьируется от 0 для водной глади до 0,44 для больших городов с небоскребами. В нашем случае примем среднее значение коэффициента 0,2.

Тогда при расчетах мы будем иметь скорость ветра, которая зависит от высоты и имеет нелинейный характер.

Таким образом, скорость на заданной высоте, будет определяться выражением:

$$V_{мек} = V_{эм} \cdot \left(\frac{h_{мек}}{h_{эм}} \right)^{0.2},$$

где $V_{мек}$ – скорость ветра на заданной высоте;

$V_{эм}$ – скорость ветра в верхней точке;

$h_{мек}$ – текущая высота;

$h_{эм}$ – верхняя точка измерения.

Для системы дифференциальных уравнений (11) заданы следующие условия: при $z = 0$, $x_1 = T_0$, $x_2 = 0$, $x_4 = 0$; при $z = h_{vert}$ $x_2 = x_{zadan}$. Поскольку при $z = 0$ значение x_3 не определено, то, учитывая структуру системы (11), удобно решить первое и третье уравнения системы с дополнительным условием:

$$\int_0^{z_{max}} x_3(z) \cdot dz = x_{zadan} \quad (12)$$

После этого можно найти длину кабеля по формуле:

$$L = \int_0^{h_{vert}} \sqrt{1 + (x_3(z))^2} \cdot dz \quad (13)$$

Используемый метод решения является, по сути, одной из вариаций метода стрельбы [21].

Решение для функции $x_1(z)$ может быть найдено аналитически по формуле:

$$x_1(z) = x_1(0) + \rho \cdot g \cdot z \quad (14)$$

Чтобы найти $x_3(z)$, разобьем интервал $0 < z < h_{vert}$ на N интервалов длины $\Delta z = \frac{h_{vert}}{N}$. Численное решение будем искать в точках $z_i = i \cdot \Delta z$, $z_i = i \Delta z$, $i = 0, 1, \dots, N$.

В качестве начального значения функции x_3 , соответствующее $z_0 = 0$, бралось значение $(x_3)_0 = B$, которое варьировалось. Для решения будем использовать метод Рунге – Кутта четвертого порядка [21]. На каждом i -м шаге ($i = 0, 1, \dots, N$) вычислим следующие коэффициенты:

$$k_1 = \frac{-\rho \cdot g \cdot (x_3)_{(i-1)} (1 + ((x_3)_{(i-1)})^2) - A \cdot v^2 \cdot \sqrt{1 + ((x_3)_{(i-1)})^2}}{(x_1)_{(i-1)}}; \quad (15)$$

$$k_2 = -\frac{-\rho g [(x_3)_{(i-1)} + k_1 \Delta z / 2] (1 + ((x_3)_{(i-1)} + k_1 \Delta z / 2)^2) - A v^2 \sqrt{(1 + ((x_3)_{(i-1)} + k_1 \Delta z / 2)^2)}}{(x_3)_{(i-1)} + \rho g \Delta z / 2}; \quad (16)$$

$$k_3 = -\frac{-\rho g [(x_3)_{(i-1)} + k_2 \Delta z / 2] (1 + ((x_3)_{(i-1)} + k_2 \Delta z / 2)^2) - A v^2 \sqrt{(1 + ((x_3)_{(i-1)} + k_2 \Delta z / 2)^2)}}{(x_3)_{(i-1)} + \rho g \Delta z / 2}; \quad (17)$$

$$k_4 = -\frac{-\rho g [(x_3)_{(i-1)} + k_3 \Delta z] (1 + ((x_3)_{(i-1)} + k_3 \Delta z)^2) - A v^2 \sqrt{(1 + ((x_3)_{(i-1)} + k_3 \Delta z)^2)}}{(x_3)_{(i-1)} + \rho g \Delta z}. \quad (18)$$

Тогда значение

$$(x_3)_i = (x_3)_{i-1} + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4). \quad (19)$$

Вычисление интеграла в правой части (13) целесообразно проводить с помощью метода Симпсона, который, с одной стороны, достаточно прост в реализации (являясь модификацией метода трапеций), с другой – позволяет добиться высокой точности результата:

$$I = \frac{\Delta z}{3} \left((x_3)_1 + 4(x_3)_2 + 2(x_3)_3 + \dots + 4(x_3)_{N-1} + (x_3)_N \right). \quad (20)$$

Что касается выбора коэффициента B , то определить его наилучшее значение можно с помощью дихотомии следующим образом. Определим из физических соображений значения коэффициентов P_0 и Q_0 такие, что при $x_3(0) = P_0$ можно гарантировать, что $x_2(h_{vert}) < x_{zadan}$, а при $x_3(0) = Q_0$ $x_2(h_{vert}) > x_{zadan}$.

Будем последовательно решать численно по описанной выше схеме уравнения для x_2 и x_3 с начальным условием $B = (P_j + Q_j)/2$, где $j = 0, 1, 2, \dots$. Если $I > x_{zadan}$, то на следующем шаге необходимо взять $P_{j+1} = P_j$, $Q_{j+1} = B$. Если $I < x_{zadan}$, то $P_{j+1} = B$, $Q_{j+1} = Q_j$. Последовательность продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто условие $|(x_2)_N - x_{zadan}| < \delta$, где δ – требуемая точность решения. В нашем случае выбиралось значение $\delta = 10^{-7}$ м, что более чем достаточно в условиях ограничений, наложенных на модель кабеля.

После этого вычислялась длина кабеля, интеграл (13) для которой также можно найти по методу Симпсона:

$$L = \frac{\Delta z}{3} \left[\sqrt{1 + ((x_3)_1)^2} + 4\sqrt{1 + ((x_3)_2)^2} + 2\sqrt{1 + ((x_3)_3)^2} + 4\sqrt{1 + ((x_3)_{(N-1)})^2} + \sqrt{1 + ((x_3)_N)^2} \right]. \quad (21)$$

3. Результаты численного расчета и необходимой мощности в зависимости от высоты подъема БПЛА, силы натяжения кабеля и скорости ветра

Задача решалась на сетке, состоящей из $N = 3000$ точек. Как метод Рунге – Кутты четвертого порядка, так и метод Симпсона обеспечивают четвертый порядок погрешности [22-23], дающий ошибку, которую можно оценить как $O(\Delta z^4)$. Таким образом, можно быть уверенным, что численное решение отличается от точного решения исходной задачи не более чем на величину порядка 10^{-4} .

Для решения системы уравнений была составлена программа на языке C#, которая позволяет получить значения требуемой мощности при различных наборах входных данных. Пользователь имеет возможность ввести в программу линейную плотность кабеля ρ (в расчетах использовалось значение 67 г/м в соответствии с практической реализацией построения кабеля), скорость ветра v на максимальной высоте подъема, которая уменьшается в соответствии с профилем скорости вблизи поверхности, высоту подъема БПЛА z_{max} , массу БПЛА с нагрузкой.

Для различных значений скорости ветра и высоты зависания БПЛА выполнено решение системы (11). Результаты вычислений приведены в Табл. 1-Табл. 3. Расчетная масса коптера с полезной нагрузкой составляла 30 кг.

Необходимая для функционирования платформы мощность рассчитывалась с помощью формулы (8).

На основе данных из таблиц видно, что существенное влияние на необходимую мощность оказывает высокая скорость ветра, так как при увеличении скорости ветра увеличивается угол наклона действия силы натяжения кабеля на БПЛА, что увеличивает горизонтальную составляющую силы натяжения. Также можно сделать вывод о том, что изменение силы натяжения лебедки существенно меняет профиль кабеля и его длину. Для системы управления важно найти баланс между силой натяжения лебедки и затрачиваемой мощностью. Слабое натяжение лебедки обеспечивает

Табл. 1. Расчет необходимой мощности при $T_0=15$ Н, высота подъема=50 м

Скорость ветра, м/с	Угол отклонения кабеля в верхней точке, °	Длина кабеля, м	Необходимая сила тяги двигателей, Н	Необходимая мощность, кВт
0	0	50	338,39	3,64
3	-0,8	50,003	338,49	3,65
6	-3,3	50,041	340,16	3,67
9	-7,5	50,209	347,02	3,78
12	-13,2	50,663	365,05	4,06
15	-20,4	51,636	400,13	4,63
18	-28,5	53,463	456,88	5,6

Табл. 2. Расчет необходимой мощности при $T_0=15$ Н, высота подъема=75 м

Скорость ветра, м/с	Угол отклонения кабеля в верхней точке, °	Длина кабеля, м	Необходимая сила тяги двигателей, Н	Необходимая мощность, кВт
0	0	75	353,094	3,87
3	-1	75,006	353,192	3,87
6	-3,9	75,097	354,858	3,9
9	-8,7	75,494	361,816	4,01
12	-15,3	76,578	379,848	4,29
15	-23,5	78,95	415,128	4,88
18	-32,7	83,628	472,066	5,87

Табл. 3. Расчет необходимой мощности при $T_0=10$ Н, высота подъема=50 м

Скорость ветра, м/с	Угол отклонения кабеля в верхней точке, °	Длина кабеля, м	Необходимая сила тяги двигателей, Н	Необходимая мощность, кВт
0	0	50	333,40	3,57
3	-1	50,004	333,49	3,57
6	-3,9	50,065	335,16	3,59
9	-8,7	50,329	342,12	3,7
12	-15,3	51,052	360,35	3,98
15	-23,5	52,633	395,72	4,55
18	-32,7	55,752	452,66	5,52

Табл. 4. Расчет необходимой мощности при $T_0=10$ Н, высота подъема=75 м

Скорость ветра, м/с	Угол отклонения кабеля в верхней точке, °	Длина кабеля, м	Необходимая сила тяги двигателей, Н	Необходимая мощность, кВт
0	0	75	348,1	3,79
3	-1,1	75,009	348,2	3,79
6	-4,4	75,146	349,86	3,82
9	-9,8	75,745	356,92	3,93
12	-17,2	77,416	375,05	4,22
15	-26,3	81,284	410,62	4,8
18	-36,8	90,836	467,75	5,79

большой выпуск кабеля, что может создать проблемы в случае запутывания. Сильное натяжение лебедкой делает профиль кабеля практически вертикальным, но при этом существенно увеличивает затрачиваемую мощность.

Полученные данные важны для оценки величины полезной нагрузки и необходимой передаваемой с земли на борт мощности для полетов в условиях турбулентной атмосферы, а также при проектировании системы управления позиционированием БПЛА.

4. Экспериментальные исследования характеристик привязной высотной беспилотной платформы

Экспериментальные исследования, подтверждающие приведенные выше теоретические результаты, были проведены с использованием разработанной под руководством и участием авторов статьи привязной высотной беспилотной платформы «Альбатрос». Указанная привязная платформа обеспечивает длительное функционирование (до 50 часов) полезной нагрузки весом до 15 кг (взлетный вес до 35 кг) на высотах до 100 м в турбулентной атмосфере (скорость ветра до 15 м/с).

Архитектура привязной высотной платформы включает следующие основные компоненты:

1. Беспилотный мультироторный аппарат большой грузоподъемности и длительного времени функционирования, предназначенный для подъема и удержания на высоте до 100 м полезной телекоммуникационной нагрузки, аппаратуры видеонаблюдения и т.д.

2. Систему передачи энергии земля-борт большой мощности, обеспечивающую электропитание двигательных установок беспилотного мультироторного аппарата и аппаратуры полезной нагрузки.

3. Систему управления и стабилизации высотной платформы, включающую резервную локальную навигационную подсистему с наземными радиомаяками для повышения точности позиционирования и помехоустойчивости по сравнению со спутниковыми навигационными системами.

4. Бортовую аппаратуру полезной нагрузки в составе базовой станции сотовой сети четвертого поколения (LTE), радиолокационного и радиорелейного оборудования, аппаратуры видеонаблюдения и т.д.

5. Кабель-трос на кевларовой основе, включающий медные провода малого сечения для передачи высоковольтных (до 1000В) сигналов и оптическое волокно для трансляции цифровой информации со скоростью до 10 Гбит/с.

6. Наземный комплекс управления, в состав которого входит преобразователь напряжения постоянного или переменного тока, система диагностики параметров высотной платформы и интеллектуальная лебедка с микропроцессорным блоком для управления натяжением кабель-троса при подъеме, спуске и ветровых нагрузках. При мобильном исполнении наземный центр управления располагается на подвижной платформе с установленным на ней электрогенератором, выходная мощность которого не менее 10 кВт.

В качестве летательного аппарата используется октокоптер (8 пропеллеров) с соосным расположением двигателей фирмы Hobbywing. Масса рамы, винтомоторных групп (двигатели, регуляторы хода, пропеллеры) и полетного контроллера составляет 13 кг. Масса DC-DC преобразователя напряжения, устанавливаемого на раму коптера, составляет 3 кг. Масса резервной батареи, обеспечивающей 8 минут полета, в случае выхода из строя наземного источника питания составляет 4 кг. Масса полезной нагрузки варьируется, в зависимости от необходимости, используется 5, 10 или 15 кг полезной нагрузки. Итого, общий вес, в зависимости от проводимых исследований и высоты подъема составляет 25, 30 или 35 кг. Масса кабель-троса, обеспечивающего передачу электроэнергии от наземного источника, составляет 67 г на 1 метр, (вес кабеля при высоте подъема 100 м составляет 6,7 кг).

В основе электронного управления БПЛА используется полетный контроллер с открытым исходным кодом PixHawk 2.1 Cube (аппаратная часть), с программным полетным стеком ArduPilot (программная часть). Определение высоты полетным контроллером осуществляется исходя из значений показателей акселеро-

метра, GPS и барометра. Для более точного измерения высоты используется высотомер LightWare SF11/C Lidar, подключенный Serial port к полётному контроллеру и обеспечивающий точное измерение высоты до 120 м. Для удержания коптера в пространстве используется GPS M8N, обеспечивающий связь по GPS и GLONASS. Направление удерживается с помощью двух магнетометров HMC5983 MAG и LIS3MDL Mag, установленных на внешнем модуле GPS. Для питания полетного контроллера используются основной и резервный DC-DC преобразователи MAUCH PL4-14S/1, преобразующий рабочее бортовое напряжение 50 V до необходимых полетному контроллеру 5,3 V. В преобразователях имеются датчики тока и напряжения, с помощью которых происходит измерение тока и напряжения резервной батареи и преобразователя от наземного источника питания. Учитывая необходимость длительного функционирования, высотный беспилотный модуль привязной платформы дополнительно оснащен для повышения надежности аппаратно-программными средствами системой безаварийной посадки при прекращении подачи энергии с земли, системой автоматического контроля температурного режима двигателей, резервной системой локальной навигации и т.д.

В рамках проведенных длительных полевых испытаний привязной высотной беспилотной платформы «Альбатрос» осуществлялось измерение потребляемой БПЛА мощности энергии в различных погодных условиях, при различном весе полезной нагрузки (от 5 кг до 15 кг) и различной высоте подъема (зависания) высотного модуля (от 50 м до 100 м). Ниже приводятся результаты испытаний как в условиях безветренной работы, так и при порывах ветра до 8 м/с и подъема на высоту 75 м полезной нагрузки весом 5 и 10 кг.

В экспериментах при безветренной погоде осуществлялся подъем беспилотного модуля, взлетный вес которого составлял 30 кг, включая вес полезной нагрузки 10 кг. Вес кабель-троса длиной 75 м составляет 5 кг. Электропитание двигательных установок БПЛА и полезной нагрузки осуществлялось с земли по кабель-тросу от дизельного генератора, установленного на автомобиле. Измеренное среднее значение потреб-

ляемого БПЛА величины тока составило 90 А при напряжении 47 В. Соответственно, средняя потребляемая мощность составила 4,2 кВт, а средняя эффективность – $k = 8,3$ г/Вт. При кратковременных увеличениях ветровой нагрузки наблюдалось увеличение тока до 105 А. Соответственно, потребляемая мощность увеличивалась до 5 кВт. Таким образом, для функционирования привязной высотной беспилотной платформы в безветренную погоду с полезным грузом 10 кг и общей весовой нагрузкой 35 кг (включающей вес кабель-троса длиной 75 м) от наземного источника на борт высотного модуля должна передаваться электроэнергия мощностью не менее 5 кВт.

С целью определения максимальных показателей потребления энергии, передаваемой с земли на борт БПЛА, испытания проводились также в ветреную погоду при стабильном ветре 5 м/с с порывами до 8 м/с.

При проведении испытаний в ветреную погоду при стабильном ветре 5 м/с измеренное усредненное значение тока составляло 82 А при напряжении 49,5 В. Соответственно, средняя потребляемая БПЛА мощность составила 4 кВт. Значения потребляемого тока находились в диапазоне от 60 А до 103 А. при этом значения потребляемой мощности изменялись от 3 кВт до 5 кВт. При порывах ветра 8 м/с пиковое значение величины тока достигало 120 А при напряжении 47 В, что соответствует максимальному потреблению энергии 5,6 кВт.

Таким образом, при функционировании привязной высотной платформы в турбулентной атмосфере (скорость ветра до 8 м/с) требуется мощность электроэнергии, передаваемой с земли на борт БПЛА до 5,6 кВт. Следует также отметить, что полученные экспериментальные результаты с достаточной для практики точностью совпадают с теоретическими результатами, описание которых приведено в предыдущих разделах.

Заключение

В статье сформулирована задача определения мощности, необходимой для функционирования привязной высотной платформы в условиях турбулентной атмосферы. Приводится методология расчета необходимой мощности, передаваемой с земли на борт БПЛА в зависи-

мости от высоты подъема, скорости ветровой нагрузки, взлетного веса высотного беспилотного модуля. Описана математическая модель, построенная для расчета силы натяжения, действующей от кабеля на БПЛА. Приводятся результаты численного расчета необходимой мощности в зависимости от высоты, силы натяжения кабель-троса и скорости ветра. Дано описание архитектуры привязной высотной беспилотной платформы, разработанной под руководством и при участии авторов статьи, и экспериментальные исследования, подтвердившие высокую точность теоретических результатов.

Литература

- Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y.-H., Debbah M. A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019. P.410-438.
- Khan M.A., Hamila R., Kiranyaz M.S., Gabbou A.M. A Novel UAV – Aided NetWork Architecture Using WiFi Direct // *IEEE Access*, 2019. Vol.7. P.67305-67318.
- Kiribayashi S., Yakushigawa K., Nagatani K. Design and Development of Tether-Powered Multirotor Micro Unmanned Aerial Vehicle System for Remote-Controlled Construction Machine. // *Field and Service Robotics*, Springer, 2018. P. 637-648.
- Kiribayashi S., Ashizawa J., Nagatani K. Modeling and Design of Tether Powered Multicopter // *Proceeding IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, West Lafayette, 2015. P. 1 - 7.
- Raj V., Raj N., Kumar J.. An Approach for Power Optimization of Tethered UAV // *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2016. Vol. 11, Issue 5. P. 23-25.
- Tognon M., Franchi A.. Position tracking control for an aerial robot passively tethered to an independently moving platform // *IFACPapersOnLine*, 2017. Vol. 50, no. 1. P. 1069–1074.
- Вишнеvский В.М., Терешенко Б.Н. Разработка и исследование нового поколения высотных привязных телекоммуникационных платформ // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*, 2013. № 7. С. 20-24.
- Wang G., Samarathunga W., Wang S. Uninterruptible Power Supply Design for Heavy Payload Tethered Hexarotors // *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 2016. Vol. 4, Issue 2. P. 16-21.
- Wasantha S., Wang G., Wang S. Heavy Payload Tethered Hexarotors for Agricultural Applications: Power Supply Design // *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2015. Vol. 2, Issue 5. P. 641-645.
- Vishnevsky V.M., Tereschenko B.N., Tumchenok D.A., Shirvanyan A.M. Optimal Method for Uplink Transfer of Power and the Design of High-Voltage Cable for Tethered High-Altitude Unmanned Telecommunication Platforms // *Communications in Computer and Information Science*, 2017. Vol.700. P. 240-247.
- Вишнеvский В.М., Терешенко Б.Н. Способ удаленного проводного электропитания объектов: Патент на изобретение № 2572822 РФ; Заяв. 16.12.2015.
- Vishnevsky V., Meshcheryakov R. Experience of Developing a Multifunctional Tethered High-Altitude Unmanned Platform of Long-Term Operation // *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2019. Vol. 11659. P.236-244.
- Вишнеvский В.М., Киричек Р.В., Ширванян А.М., Тумченко Д.А. Конструкция и требования к кабель-тросу для питания беспилотной привязной телекоммуникационной платформы // *Proceedings of the 22nd International Scientific Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2019, Moscow)*. М.: РУДН, 2019. С. 12-18.
- Albisser M. Identification of Aerodynamic Coefficients from Free-Flight Data // *Université de Lorraine, Nancy, France*, 2015, Ph.D. thesis.
- Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения / Москва: Стройиздат, 1972. 110 С.
- XRotor 8 Series Power Combo for Agricultural Drones. URL: http://www.hobbywing.com/goods.php?id=560&filter_attr=0 (Дата обращения 19.04.2020).
- T-motor the safer propulsion system. URL: http://uav-en.tmotor.com/html/uav/html/2019/p_0129/208.html (Дата обращения 19.04.2020).
- Vishnevsky V.M., Tumchenok D.A., Shirvanyan A.M. Mathematical Model of the Dynamics of Operation of the Tethered High-Altitude Telecommunication Platform in the Turbulent Atmosphere / *Proceedings of International Scientific Conference «2019 systems of signals generating and processing in the field of on board communications» (IEEE Conference #46544)*, Moscow. Moscow: IEEE, 2019. P. 1-7.
- Эберт Г. Краткий справочник по физике: справочное издание/ пер. со 2-го нем. изд. [Н. М. Шикунинной]; под ред. К. П. Яковлева. М.: Физматгиз, 1963. 552 с.
- Touma J.S. Dependence of the wind profile power law on stability for various locations // *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1977. Vol. 27 (9). P. 863-866.
- Süli E., Mayers D. *An Introduction to Numerical Analysis* / Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 444 p.
- Hazewinkel, Michiel, ed. (2001) [1994], "Simpson formula", *Encyclopedia of Mathematics*, Springer Science // Kluwer Academic Publishers, ISBN 978-1-55608-010-4

Вишнеvский Владимир Миронович. Институт проблем управления Российской академии наук им. В.А.Трапезникова г. Москва, Россия. Заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки в Российской Федерации. Количество печатных работ: 141(в т.ч. 4 монографии). Область научных интересов: привязные высотные платформы, информационные технологии. E-mail: vishn@inbox.ru

Ширванян Артём Мартирович. Институт проблем управления Российской академии наук им. В.А.Трапезникова г. Москва, Россия. Научный сотрудник. Количество печатных работ:24. Область научных интересов: привязные высотные платформы, информационные технологии. E-mail: artshirvanyan@mail.ru

Бряшко Николай Николаевич. Институт проблем управления Российской академии наук им. В.А.Трапезникова г. Москва, Россия. Ведущий инженер-электроник. Область научных интересов: привязные высотные платформы, информационные технологии.

Calculation of the Required Power for the Operation of a Tethered Unmanned Platform in a Turbulent Atmosphere

V. M. Vishnevsky, A. M. Shirvnyan, N. N. Bryashko

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The article is devoted to assessing the necessary power transmitted on board of tethered high-altitude unmanned platform, in which the power of the propulsion systems and the payload is carried out from a ground source of energy through a cable. A brief conclusion and solution of a system of differential equations is given for describing the position of the cable in space and the forces of its action on a high-altitude unmanned platform in a turbulent atmosphere. When calculating the power, the gravity of the aircraft with the payload, the effect of the cable on the unmanned platform and the resistance force of the platform to the wind were taken into account. The architecture of a system consisting of a ground station, a cable cable and an aircraft is described, as well as the results of field tests, which showed good match with the results of theoretical studies.

Keywords: tethered unmanned telecommunications platform, high-power energy transmission system, system of differential equations, unmanned aerial vehicle.

DOI 10.14357/20718632200307

References

1. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y.-H., Debbah M. A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019. P.410-438.
2. Khan M.A., Hamila R., Kiranyaz M.S., Gabbou A.M. A Novel UAV – Aided NetWork Architecture Using WiFi Direct // *IEEE Access*, 2019. Vol.7. P.67305-67318.
3. Kiribayashi S., Yakushigawa K., Nagatani K. Design and Development of Tether-Powered Multirotor Micro Unmanned Aerial Vehicle System for Remote-Controlled Construction Machine. // *Field and Service Robotics*, Springer, 2018. P. 637-648.
4. Kiribayashi S., Ashizawa J., Nagatani K. Modeling and Design of Tether Powered Multicopter // *Proceeding IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, West Lafayette, 2015. P. 1 - 7.
5. Raj V., Raj N., Kumar J.. An Approach for Power Optimization of Tethered UAV // *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2016. Vol. 11, Issue 5. P. 23-25.
6. Tognon M., Franchi A.. Position tracking control for an aerial robot passively tethered to an independently moving platform // *IFAC PapersOnLine*, 2017. Vol. 50, no. 1. P. 1069–1074.
7. Vishnevsky V.M., Tereschenko B.N. Razrabotka i issledovanie novogo pokoleniya vysotnyh privyaznyh telekommunikacionnyh platform [Development and research of a new generation of high-altitude tethered telecommunication platforms]. *T-Comm: Telekommunikacii i transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]*, 2013. № 7. P. 20-24.
8. Wang G., Samarathunga W., Wang S. Uninterruptible Power Supply Design for Heavy Payload Tethered Hexarotors // *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 2016. Vol. 4, Issue 2. P. 16-21.
9. Wasantha S., Wang G., Wang S. Heavy Payload Tethered Hexarotors for Agricultural Applications: Power Supply Design // *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2015. Vol. 2, Issue 5. P. 641-645.
10. Vishnevsky V.M., Tereschenko B.N., Tumchenok D.A., Shirvanyan A.M. Optimal Method for Uplink Transfer of Power and the Design of High-Voltage Cable for Tethered High-Altitude Unmanned Telecommunication Platforms // *Communications in Computer and Information Science*, 2017. Vol.700. P. 240-247.

11. Vishnevsky V.M., Tereschenko B.N. Sposob udalennogo provodnogo elektropitaniya obektov [Method for remote wired power supply of objects]. Patent RF No 2572822.
12. Vishnevsky V., Meshcheryakov R. Experience of Developing a Multifunctional Tethered High-Altitude Unmanned Platform of Long-Term Operation // Lecture Notes in Computer Science, Springer, 2019. Vol. 11659. P.236-244.
13. Vishnevsky V.M., Kirichek R.V., Shirvanyan A.M., Tumchenok D.A. Konstrukciya i trebovaniya k kabel'-trosu dlya pitaniya bespilotnoj privyaznoj telekommunikacionnoj platformy [Cable design and requirements for powering an unmanned tethered telecommunications platform]. Proceedings of the 22nd International Scientific Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2019, Moscow). M.: RUDN, 2019. P. 12-18.
14. Albisser M. Identification of Aerodynamic Coefficients from Free-Flight Data // Université de Lorraine, Nancy, France, 2015, Ph.D. thesis.
15. Savitsy G.A. Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya [Wind load on structures] / Moscow: Strojizdat, 1972. 110 P.
16. XRotor 8 Series Power Combo for Agriculutral Drones. Available at: http://www.hobbywing.com/goods.php?id=560&filter_attr=.0 (Acceded April 19, 2020).
17. T-motor the safer propulsion system. Available at: http://uav-en.tmotor.com/html/uav/html/2019/p_0129/208.html (Acceded April 19, 2020).
18. Vishnevsky V.M., Tumchenok D.A., Shirvanyan A.M. Mathematical Model of the Dynamics of Operation of the Tethered High-Altitude Telecommunication Platform in the Turbulent Atmosphere / Proceedings of International Scientific Conference «2019 systems of signals generating and processing in the field of on board communications» (IEEE Conference #46544), Moscow. Moscow: IEEE, 2019. P. 1-7.
19. H. Ebert, Physikalisches Taschenbuch [Russian translation], Moscow, 1963. 552 p.
20. Touma J.S. Dependence of the wind profile power law on stability for various locations // Journal of the Air Pollution Control Association, 1977. Vol. 27 (9). P. 863-866.
21. Süli E., Mayers D. An Introduction to Numerical Analysis / Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 444 p.
22. Hazewinkel, Michiel, ed. (2001) [1994], "Simpson formula", Encyclopedia of Mathematics, Springer Science // Kluwer Academic Publishers, ISBN 978-1-55608-010-4

Vishnevsky V. M. Professor V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia. E-mail: vishn@inbox.ru

Shirvanyan A. M. Research associate V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia. E-mail: artshirvanyan@mail.ru (Corresponding author)

Bryahko N. N. Lead Electronics Engineer V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia.