

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова  
Российской академии наук

На правах рукописи



Ширванян Артём Мартиросович

**Разработка и исследование математической модели привязных  
высотных беспилотных телекоммуникационных платформ,  
функционирующих в турбулентной атмосфере.**

Специальность 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ.

### **АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук.

Научный руководитель Доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
Вишневский Владимир Миронович

Официальные оппоненты Доктор технических наук, профессор  
кафедры сетей связи и передачи данных  
Санкт-Петербургского государственного  
университета телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
Парамонов Александр Иванович

Кандидат технических наук, доцент,  
декан приборостроительного факультета  
Ижевского государственного  
технического университета  
им. М.Т. Калашникова  
Абилов Альберт Винерович

Ведущая организация Федеральное государственное  
учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт  
прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук"

Защита состоится 22 ноября 2021 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.1.107.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук по адресу: Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПУ РАН и на сайте [www.ipu.ru](http://www.ipu.ru).

Автореферат разослан — \_\_\_\_ || \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета 24.1.107.01,

Кандидат технических наук

Е.Ф.Жарко

## **Общая характеристика работы.**

### **Актуальность темы.**

В настоящее время широкое развитие получили высотные телекоммуникационные платформы, реализуемые на автономных беспилотных летательных аппаратах. Основным недостатком автономных беспилотных летающих аппаратов (БПЛА) является ограниченное время функционирования, связанное с малым ресурсом аккумуляторов БПЛА, оснащенных электрическими двигателями, или в случае использования двигателей внутреннего сгорания с ограниченным запасом топлива. 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. Возможность передачи энергии большой мощности (10-15 кВт) по кабелю с земли на борт БПЛА позволяет осуществлять подъем и удержание на высотах 100-150 метров полезной телекоммуникационной нагрузки в течение длительного времени, ограниченного лишь надежностными характеристиками БПЛА.

Следует отметить, что исследованию автономных БПЛА и реализации на их базе широкополосных беспроводных сетей посвящены многочисленные публикации отечественных и зарубежных авторов: А.С.Аджемов, А.В.Абилов, А.Е.Кучерявый, А.И. Парамонов, Omar Bouhamed, Hakim Ghazzai, Xiaoyan Ma, Rahim Kasimi и др. В тоже время методы проектирования привязных высотных беспилотных платформ, имеющих обширные применения, слабо отражены в современной мировой литературе. Отметим лишь работы следующих авторов: В.М.Вишнеvский, В.М.Рулевский, S.Kiribayashi, M. Tognon, A. Franchi, M. Nicotra, K.Nagatani, E. Dicembrini.

Исследование разработанной в диссертации математической модели привязной беспилотной высотной платформы позволяет определить силы, действующие на беспилотный модуль, и, соответственно, определить важнейшую характеристику при проектировании привязных беспилотных высотных комплексов – требуемую мощность, передаваемую с земли на борт для функционирования БПЛА в условиях турбулентной атмосферы. Расчет необходимой мощности, передаваемой с земли на борт высотного беспилотного модуля, 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). Величина передаваемой мощности определяет характеристики двигательных установок и архитектуру

мультироторного высотного модуля, а также выбор параметров и структуру высоковольтного кабель-троса, включающего медные провода, оптоволокно и кевларовую нить. В связи с этим, предлагаемая в настоящей диссертационной работе новая математическая модель функционирования привязной беспилотной высотной платформы, а также теоретические и экспериментальные методы исследования привязных беспилотных платформ, функционирующих в турбулентной атмосфере, являются актуальными и имеют важное значение при проектировании подобных робототехнических комплексов.

**Целью диссертационной работы** является построение и исследование математической модели привязной телекоммуникационной платформы, что позволяет оценить требуемую мощность для функционирования высотного беспилотного модуля в условиях турбулентной атмосферы.

В рамках достижения поставленной цели решаются следующие **научные задачи**:

построение математической модели системы, включающей наземный комплекс управления, кевларовый кабель-трос с высоковольтными медными проводами и оптоволокном и высоконадежный беспилотный летательный аппарат, находящийся в условиях турбулентной атмосферы;

разработка метода и алгоритма решения системы дифференциальных уравнений, адекватно описывающей функционирование платформы при ветровых нагрузках, для расчета силы натяжения, являющейся одной из основных компонент при определении требуемой мощности энергии, передаваемой с земли на борт привязной высотной беспилотной платформы;

разработка методологии расчета величины мощности, определяющей выбор параметров всех компонент привязной платформы: высотного беспилотного модуля, наземной и бортовой системы управления, системы передачи энергии земля-борт;

разработка программного комплекса, реализующего алгоритмы расчета требуемой мощности для функционирования привязной высотной беспилотной платформы, находящейся в условиях турбулентной атмосферы;

разработка методологии проведения экспериментальных исследований по функционированию привязной высотной беспилотной платформы в условиях ветровых нагрузок;

проведение сравнительного анализа теоретических результатов с результатами экспериментальных исследований, выполненных с использованием привязной беспилотной платформы «Альбатрос», в проектировании и реализации которой принимал участие автор диссертационной работы.

**Объектом исследования** является привязная высотная беспилотная платформа.

**Предметом исследования** является математическая модель динамики привязной высотной беспилотной платформы в условиях турбулентной

атмосферы и воздействия кабель-троса.

**Научная новизна работы** заключается в разработке и исследовании новой математической модели динамики привязной высотной беспилотной платформы, учитывающей ветровую нагрузку, а также в предложенном алгоритме решения системы дифференциальных уравнений, позволяющем оценить требуемую мощность для функционирования высотного модуля, что является важным показателем при разработке каждой компоненты привязной беспилотной платформы.

Получены следующие новые научные результаты:

построена математическая модель функционирования привязного беспилотного летательного аппарата, адекватно описывающая функционирование привязного БПЛА в турбулентной атмосфере;

разработаны и апробированы методы решения системы дифференциальных уравнений для расчета необходимой мощности, передаваемой с земли на борт БПЛА. Проведен расчет необходимой мощности, определяющий выбор основных параметров всех компонент привязной высотной платформы: коптера, кабель-троса, наземной системы управления;

разработан программный комплекс, реализующий алгоритмы расчета требуемой мощности.

**Практическая важность работы.** Построенная новая математическая модель описывает положение привязной высотной беспилотной платформы и учитывает ветровые нагрузки на коптер и кабель-трос, параметры высоты подъема, характеристики кабеля. Предложенные методы и алгоритмы решения системы дифференциальных уравнений, позволяют с высокой точностью определять силы, действующие на платформу, и требуемую мощность для функционирования платформы в турбулентной атмосфере. На языке высокого уровня разработано программное обеспечение под управлением операционной системы Windows, реализующее алгоритмы численных методов и позволяющее получить численные решения определения мощности в зависимости от входных параметров. Практическая значимость работы заключается в том, что использование методов оценки необходимой мощности является основой проектирования всех компонент привязной беспилотной высотной платформы. Результаты диссертационной работы использованы при проектировании и реализации привязной высотной беспилотной платформы нового поколения «Альбатрос», разработанной в ИПУ РАН, что подтверждается актами о внедрении.

**Область исследования.** Диссертационная работа соответствует содержанию специальности 1.2.2, а именно разработке фундаментальных основ и применению математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем. В выполненной работе присутствуют оригинальные результаты одновременно из трех областей:

математического моделирования, численных методов и комплексов программ. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам специальности:

разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений;

реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента;

комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента;

разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

математическая модель привязного объекта, в качестве примера которого рассматривается привязная высотная беспилотная платформа, шарнирно закрепленная в верхней части и находящаяся в условиях турбулентной атмосферы;

метод и алгоритм решения системы дифференциальных уравнений, адекватно описывающей функционирование платформы при ветровых нагрузках, для расчета силы натяжения, являющейся одной из основных компонент при определении требуемой мощности энергии, передаваемой с земли на борт привязной высотной беспилотной платформы;

методология расчета величины мощности, определяющей выбор параметров всех компонент привязной платформы: высотного беспилотного модуля, наземной и бортовой системы управления, системы передачи энергии земля-борт;

программный комплекс для численного расчета основных характеристик проектируемой платформы, что определяет необходимое значение мощности, передаваемой с наземной станции на борт высотной платформы, в зависимости от различных показателей высоты подъема, скорости ветра в точке зависания коптера, отклонения платформы от вертикали, силы натяжения кабеля от лебедки и веса полезной нагрузки;

метод экспериментальных исследований на реальной модели привязной высотной платформы «Альбатрос», проведенных в лабораторных и полевых условиях.

**Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций, а также достоверность полученных результатов исследований** обеспечивается корректным использованием математического анализа и введённых допущений, а также высокой точностью совпадения теоретических и экспериментальных результатов.

**Связь диссертационной работы с планами научных исследований:**

Полученные результаты использованы в:

программе фундаментальных исследований президиума РАН «Теория и технологии многоуровневого децентрализованного группового управления в условиях конфликта и кооперации» (2018-2020 гг.);

гранте РФФИ 19-29-06043 (умный город) «Разработка теоретических основ проектирования привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ длительного функционирования» (2019-2021 гг.);

гранте РФФИ 20-37-70059 (стабильность) «Разработка комплекса математических моделей, методов и алгоритмов проектирования широкополосных беспроводных сетей нового поколения на базе автономных и привязных высотных беспилотных платформ» (2020-2021 гг.).

#### **Апробация работы.**

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

11-я Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества» (Москва, 2017);

20-я международная конференция International Conference, Distributed Computer and Communication Networks (DCCN 2017, Москва);

21-я Международная научная конференция "Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь" (DCCN-2018, Москва);

международная конференция International Scientific Conference «2019 systems of signals generating and processing in the field of on board communications»(Москва, 2019 г.);

22-я международная конференция International Scientific Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2019, Москва);

научные семинары Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (рук. д.ф.-м.н. профессор Боголюбов А.Н. 2019 г.) и Института проблем управления им.В.А.Трапезникова (рук. д.т.н. профессор Вишневецкий В.М. 2021 г.).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы из 91 наименования. Работа содержит 103 страницы основного текста, включая 16 таблиц, 22 рисунка и 2 приложения.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них 5 в изданиях, индексируемых в WoS/Scopus и 3 публикации в изданиях из перечня ВАК. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Работа [15] выполнена автором самостоятельно. В работах [1, 4, 6, 7, 11] автору принадлежит постановка задачи, разработка методов решения, разработка методологии и программная

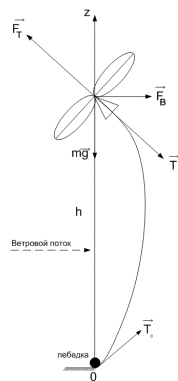
реализация комплекса программ, в работах [2, 3] принадлежит совместная постановка задачи и разработка методов, в работах [5, 8, 14] постановка задачи и разработка алгоритмов, в работах [9, 10, 12] принадлежит совместная постановка задачи, совместная реализация комплекса программ, в работе [13] автору принадлежит обзор текущего состояния в области привязных высотных платформ.

### Содержание диссертации

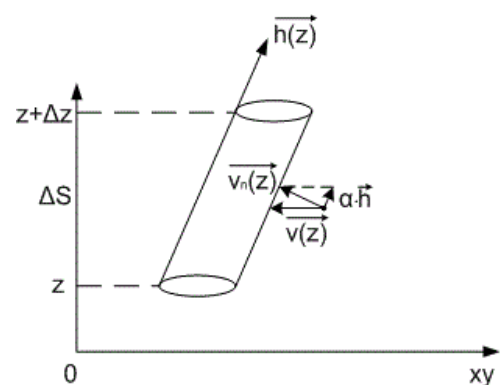
Во **введении** рассмотрена актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, показана научная новизна основных результатов работы, выносимых на защиту.

**В первой главе** описано текущее состояние исследований в области привязных высотных телекоммуникационных платформ, перспективы их развития, рассмотрены известные в литературе модели функционирования привязных объектов. Описана, ранее не исследованная в мировой литературе, математическая модель расчета силы натяжения, шарнирно закрепленного в верхней точке привязного объекта на примере функционирования привязной высотной беспилотной платформы. Осуществляется поиск основной неизвестной силы – силы натяжения кабеля, действующей на беспилотную высотную платформу, функционирующую в турбулентной атмосфере.

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.1), а верхний конец шарнирно крепится к платформе. Платформа обеспечивает натяжение кабеля по всей его длине вплоть до лебедки.



**Рисунок 1.** Схематичное изображение привязной высотной платформы и сил, действующих на нее.



**Рисунок 2.** Элемент кабеля.

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



$$\begin{cases} x = x(z); \\ y = y(z); \end{cases} \quad (1)$$

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.

Рассмотрим элемент кабеля длиной  $\Delta S$  (рис.2), имеющий координаты по оси  $Oz$  от  $z$  до  $z + \Delta z$ .

Его длина удовлетворяет равенству

$$\Delta S = \Delta z \sqrt{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2} + o(\Delta z), \quad (2)$$

где  $\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{o(\Delta z)}{\Delta z} = 0$ .

Вектор

$$\mathbf{h}(z) = \frac{dx(z)}{dz} \mathbf{i} + \frac{dy(z)}{dz} \mathbf{j} + \mathbf{k}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{k}$  – единичные векторы осей  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$  соответственно, задает направление касательной к кабелю (рис. 2). Скорость ветра выражается в виде:

$$\mathbf{v}(z) = v_x(z) \mathbf{i} + v_y(z) \mathbf{j} + 0 \mathbf{k}. \quad (4)$$

Нормальная составляющая скорости ветра к оси кабеля определяется из соотношения:

$$\mathbf{v}_n(z) = \mathbf{v}(z) + \alpha \cdot \mathbf{h}(z), \quad (5)$$

где  $\alpha$  – некоторый коэффициент, характеризующий скорость ветра в направлении касательной.

Отсюда

$$\alpha = \frac{-\mathbf{v}(z) \cdot \mathbf{h}(z)}{h^2(z)}. \quad (6)$$

Учитывая, что

$$h^2(z) = 1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2, \quad (7)$$

получим

$$\alpha = \frac{-\mathbf{v}_x(\mathbf{z}) \cdot \frac{dx(z)}{dz} - \mathbf{v}_y(\mathbf{z}) \cdot \frac{dy(z)}{dz}}{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2}. \quad (8)$$

Подставляя (3),(4),(8) в (5) и учитывая, что

$$|\mathbf{v}_n(\mathbf{z})| = \sqrt{\mathbf{v}_n(\mathbf{z}) \cdot \mathbf{v}_n(\mathbf{z})}, \quad (9)$$

получим значение скорости ветра, воздействующего на элемент кабеля, в виде:

$$|\mathbf{v}_n(\mathbf{z})| = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + \left(v_x \cdot \frac{dy(z)}{dz} - v_y \cdot \frac{dx(z)}{dz}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2}}. \quad (10)$$

Давление ветра на кабель вычисляется по формуле:

$$P_{sf} = A \cdot v^2, \quad (11)$$

где  $A$  – коэффициент аэродинамического сопротивления, кг/м<sup>2</sup>;  $v$  – скорость ветра, м/с.

Нормальная ветровая нагрузка на элемент кабеля длины  $\Delta S$  равна

$$\mathbf{F}_n(\mathbf{z}) = A \cdot \mathbf{v}_n(\mathbf{z}) \cdot |\mathbf{v}_n(\mathbf{z})| \cdot \Delta S. \quad (12)$$

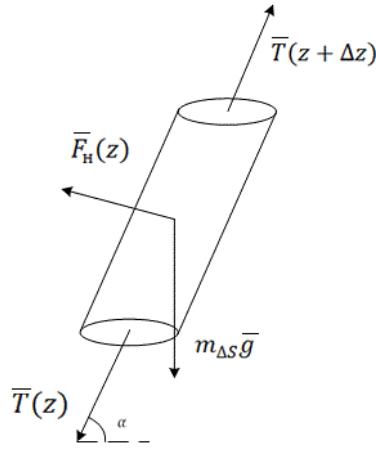
Подставляя (2),(10) в (12) получим:

$$\mathbf{F}_n(\mathbf{z}) = \frac{A \cdot \Delta z \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + \left(v_x \cdot \frac{dy(z)}{dz} - v_y \cdot \frac{dx(z)}{dz}\right)^2}}{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2} \cdot \left( \begin{array}{l} \left( v_x \cdot \left( 1 + \left( \frac{dy(z)}{dz} \right)^2 \right) - v_y \cdot \left( \frac{dx(z)}{dz} \cdot \frac{dy(z)}{dz} \right) \right) \cdot \mathbf{i} + \\ \left( v_y \cdot \left( 1 + \left( \frac{dx(z)}{dz} \right)^2 \right) - v_x \cdot \frac{dx(z)}{dz} \cdot \frac{dy(z)}{dz} \right) \cdot \mathbf{j} + \\ \left( -v_x \cdot \frac{dx(z)}{dz} - v_y \cdot \frac{dy(z)}{dz} \right) \cdot \mathbf{k} \end{array} \right) + o(z) \quad (13)$$

Проекция силы тяжести элемента кабеля длины  $\Delta S$  отлична от нуля только на ось  $OZ$  и равна

$$F_g(z) = -\rho \cdot g \cdot \Delta S = -\rho \cdot g \cdot \Delta z \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2} + o(z), \quad (14)$$

где  $\rho$  – линейная плотность провода (кг/м).



**Рисунок 3. Силы, действующие на элемент кабеля.**

Запишем проекцию силы  $T(z)$  на ось  $Ox$  :

$$T_x(z) = -T(z) \cdot \cos \alpha . \quad (15)$$

Учитывая (2) получим:

$$T_x(z) = -T(z) \cdot \frac{\frac{dx(z)}{dz}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2}} . \quad (16)$$

Спроецируем остальные силы (рис.3) на ось  $Ox$  и запишем уравнение равновесия сил, действующих на элемент кабеля длины  $\Delta s$  :

$$\begin{aligned} & -T(z) \cdot \frac{\frac{dx(z)}{dz}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2}} + T(z + \Delta z) \cdot \frac{\frac{dx(z + \Delta z)}{dz}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dx(z + \Delta z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z + \Delta z)}{dz}\right)^2}} + \\ & + F_{nx}(z) = o(z) \end{aligned} \quad (17)$$

Проекция на ось  $Oy$  имеет вид:

$$\begin{aligned} & -T(z) \cdot \frac{\frac{dy(z)}{dz}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2}} + T(z + \Delta z) \cdot \frac{\frac{dy(z + \Delta z)}{dz}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dx(z + \Delta z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z + \Delta z)}{dz}\right)^2}} + \\ & + F_{ny}(z) = o(z) \end{aligned} \quad (18)$$

Проекция на ось  $Oz$  имеет вид:

$$\begin{aligned}
& -T(z) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2}} + T(z + \Delta z) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dx(z + \Delta z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z + \Delta z)}{dz}\right)^2}} + \\
& F_{nz}(z) - \rho \cdot g \cdot \Delta z \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2} = o(z)
\end{aligned} \tag{19}$$

Подставим в уравнения (17), (18), (19) величину нормальной ветровой нагрузки на элемент кабеля (12). Затем разделим на  $\Delta z$  и перейдем к пределу  $\Delta z \rightarrow 0$ . Тогда получим:

Проекция на ось  $Ox$ :

$$\begin{aligned}
& T \cdot \frac{d^2x}{dz^2} + \frac{dT}{dz} \cdot \frac{dx}{dz} - \frac{T \cdot \frac{dx}{dz} \cdot \left(\frac{dx}{dz} \cdot \frac{d^2x}{dz^2} + \frac{dy}{dz} \cdot \frac{d^2y}{dz^2}\right)}{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2} + \\
& + \frac{A \cdot \sqrt{v_x^2(z) + v_y^2(z) + \left(v_x(z) \cdot \frac{dy}{dz} - v_y(z) \cdot \frac{dx}{dz}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2}} = 0
\end{aligned} \tag{20}$$

Проекция на ось  $Oy$ :

$$\begin{aligned}
& T \cdot \frac{d^2y}{dz^2} + \frac{dT}{dz} \cdot \frac{dy}{dz} - \frac{T \cdot \frac{dy}{dz} \cdot \left(\frac{dx}{dz} \cdot \frac{d^2x}{dz^2} + \frac{dy}{dz} \cdot \frac{d^2y}{dz^2}\right)}{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2} + \\
& + \frac{A \cdot \sqrt{v_x^2(z) + v_y^2(z) + \left(v_x(z) \cdot \frac{dy}{dz} - v_y(z) \cdot \frac{dx}{dz}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dx(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy(z)}{dz}\right)^2}} = 0
\end{aligned} \tag{21}$$

Проекция на ось  $Oz$ :

$$\frac{dT}{dz} - \frac{T \cdot \left( \frac{dx}{dz} \cdot \frac{d^2x}{dz^2} + \frac{dy}{dz} \cdot \frac{d^2y}{dz^2} \right)}{1 + \left( \frac{dx(z)}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dy(z)}{dz} \right)^2} + \frac{A \cdot \sqrt{v_x^2(z) + v_y^2(z) + \left( v_x(z) \cdot \frac{dy}{dz} - v_y(z) \cdot \frac{dx}{dz} \right)^2}}{\sqrt{1 + \left( \frac{dx(z)}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dy(z)}{dz} \right)^2}}. \quad (22)$$

$$\left( -v_x(z) \cdot \frac{dx}{dz} - v_y(z) \cdot \frac{dy}{dz} \right) - \rho \cdot g \cdot \left( 1 + \left( \frac{dx(z)}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dy(z)}{dz} \right)^2 \right) = 0$$

Здесь и далее аргумент  $z$  у производных и некоторых функций опущен для краткости написания. Тогда система уравнений (20), (21), (22) эквивалентна следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT}{dz} - \rho \cdot g = 0; \\ T \cdot \frac{d^2x}{dz^2} + \rho \cdot g \cdot \frac{dx}{dz} \cdot \left( 1 + \left( \frac{dx(z)}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dy(z)}{dz} \right)^2 \right) + \\ A \cdot \sqrt{v_x^2(z) + v_y^2(z) + \left( v_x(z) \cdot \frac{dy}{dz} - v_y(z) \cdot \frac{dx}{dz} \right)^2} \cdot v_x(z) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{dx(z)}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dy(z)}{dz} \right)^2} = 0; \\ T \cdot \frac{d^2y}{dz^2} + \rho \cdot g \cdot \frac{dy}{dz} \cdot \left( 1 + \left( \frac{dx(z)}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dy(z)}{dz} \right)^2 \right) + \\ A \cdot \sqrt{v_x^2(z) + v_y^2(z) + \left( v_x(z) \cdot \frac{dy}{dz} - v_y(z) \cdot \frac{dx}{dz} \right)^2} \cdot v_y(z) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{dx(z)}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dy(z)}{dz} \right)^2} = 0; \end{array} \right. \quad (23)$$

Длина кабеля  $L$  описывается следующим дифференциальным уравнением первого порядка

$$\frac{dL}{dz} = \sqrt{1 + \left( \frac{dx(z)}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dy(z)}{dz} \right)^2}, \quad (24)$$

с начальным условием  $L(0) = 0$ .

Таким образом, положение равновесия кабеля при горизонтальной скорости ветра и длина кабеля описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений (23), (24).

Сложность рассматриваемой задачи заключается в том, что необходимо решать не задачу Коши, а краевую задачу, когда условия задаются при различных значениях аргумента  $z$ . Результатом решения системы дифференциальных уравнений будет определение силы натяжения (модуль и угол наклона).

**Во второй главе** приводится алгоритм решения системы дифференциальных уравнений и производится расчет силы натяжения в зависимости от высоты подъема БПЛА, горизонтального отклонения БПЛА от точки зависания, скорости ветра в верхней точке шарнирного крепления кабель троса и коптера и взлетного веса БПЛА с учетом полезной нагрузки.

Совместим нижний конец кабеля с началом системы координат  $OXYZ$ . Предположим, что лебедка обеспечивает постоянное натяжение нижнего конца кабеля  $T_0$ . Платформа с помощью системы управления удерживается в окрестности точки, расположенной по вертикали на заданной высоте. Необходимо оценить величину и направление силы, действующей от кабеля на беспилотный летательный аппарат при различной скорости ветра.

Для упрощения расчетов будем предполагать, что направление ветра совпадает с направлением оси  $OX$ , что позволяет рассматривать положение кабеля в плоскости  $OXZ$ . Систему уравнений (23), (24) преобразуем к следующему виду путем замены переменных:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dz} = \rho \cdot g; \\ \frac{dx_2}{dz} = x_3; \\ \frac{dx_3}{dz} = \frac{-\rho \cdot g \cdot x_3 \cdot (1 + x_3^2) - A \cdot v^2 \cdot \sqrt{1 + x_3^2}}{x_1}; \\ \frac{dx_4}{dz} = \sqrt{1 + x_3^2}; \end{cases} \quad (25)$$

где:

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

$x_1$  – сила натяжения кабеля (Н);

$\rho = 0.067$  – линейная плотность провода (кг/м);

$g = 9.8$  – ускорение свободного падения (м/с<sup>2</sup>);

$x_2$  – отклонение кабеля от вертикали (м);

$x_3$  – тангенс угла наклона кабеля от вертикали;

$A = 0.003$  – коэффициент аэродинамического сопротивления (кг/м<sup>2</sup>);

$v$  – скорость ветра (м/с);

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

Для системы дифференциальных уравнений заданы следующие условия: при  $z = 0$   $x_1 = T_0 = 15$  Н,  $x_2 = 0$ ,  $x_4 = 0$ ; при  $z = h_{vert}$   $x_2 = x_{zadan}$ . Поскольку при  $z = 0$  значение  $x_3$  не определено, то, учитывая структуру системы дифференциальных уравнений, удобно решить первое и третье уравнения системы с дополнительным условием:

$$\int_0^{z_{max}} x_3(z) dz = x_{zadan}. \quad (26)$$

После этого можно найти длину кабеля по формуле:

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

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

$$x_1(z) = x_1(0) + \rho g z$$

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  $z_i = i\Delta z$ ,  $i = 0, 1, \dots, N$

В качестве начального значения функции  $x_3$  соответствующее  $z_0 = 0$ , бралось значение  $(x_3)_0 = B$ , которое варьировалось. Для решения будем использовать классические численные методы решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений и их систем. На каждом  $i$ -м шаге ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) вычислим следующие коэффициенты:

$$k_1 = -\frac{-\rho g (x_3)_{(i-1)} (1 + ((x_3)_{(i-1)})^2) - Av^2 \sqrt{1 + ((x_3)_{(i-1)})^2}}{(x_1)_{(i-1)}};$$

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

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

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

Тогда значение

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

Вычисление интеграла (26) проводим с помощью метода Симпсона:

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

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 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  $\delta$  – требуемая точность решения. В нашем случае выбиралось значение  $\delta = 10^{-7}$  м, что более чем достаточно в условиях ограничений, наложенных на модель кабеля.

Решение задачи производилось на сетке, состоящей из  $N = 3000$  точек. Используемые для решения метод Рунге – Кутта четвертого порядка и метод Симпсона обеспечивают четвертый порядок погрешности, 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 С#, которая позволяет получить значения модуля и угла наклона силы натяжения, действующей на коптер и приложенной в точке шарнирного крепления кабель-троса и коптера при различных наборах входных данных. Пользователь имеет возможность ввести в программу линейную плотность кабеля  $\rho$ , скорость ветра  $v$ , высоту подъема БПЛА  $z_{\max}$ , силу натяжения лебедки кабель троса в нижней точке крепления, а также смещение коптера в верхней точке  $x_{last}$ .

Для различных значений скорости ветра и высоты зависания БПЛА выполнено решение системы дифференциальных уравнений. Результаты приведены в таблицах:

Таблица 1. Расчет силы натяжения, взлетный вес 30 кг, натяжение лебедки 10 Н, высота 50 м.

Скорость ветра, м/с	Угол отклонения кабеля в верхней точке, °	Длина кабеля, м	Горизонтальная составляющая, Н	Вертикальная составляющая, Н
0	0	50	0	42,83
4	-1,6	50,011	1,197	42,813
8	-6,4	50,185	4,768	42,564
12	-14,2	50,946	10,539	41,513
16	-24,7	53,106	17,899	38,91

Таблица 2. Расчет силы натяжения, взлетный вес 30 кг, натяжение лебедки 10 Н, высота 75 м.

Скорость ветра, м/с	Угол отклонения кабеля в верхней точке, °	Длина кабеля, м	Горизонтальная составляющая, Н	Вертикальная составляющая, Н
0	0	75	0	59,245
4	-1,8	75,026	1,852	59,216
8	-7,1	75,412	7,373	58,784
12	-15,9	77,147	16,246	56,974
16	-27,6	82,507	27,431	52,512

Таблица 3. Расчет силы натяжения, взлетный вес 30 кг, натяжение лебедки 10 Н, высота 100 м.

Скорость ветра, м/с	Угол отклонения кабеля в верхней точке, °	Длина кабеля, м	Горизонтальная составляющая, Н	Вертикальная составляющая, Н
0	0	100	0	75,66
4	-1,9	100,044	2,523	75,618
8	-7,6	100,713	10,04	74,991
12	-17	103,807	22,109	72,358
16	-29,8	115,848	37,643	65,631



Таблица 4. Расчет силы натяжения, взлетный вес 30 кг, натяжение лебедки 30 Н, отклонение от точки зависания 0 м, высота 100 м.

Скорость ветра, м/с	Угол отклонения кабеля в верхней точке, °	Длина кабеля, м	Горизонтальная составляющая, Н	Вертикальная составляющая, Н
0	0	100	0	95,66
4	-1,4	100,015	2,321	95,632
8	-5,6	100,237	9,255	95,211
12	-12,4	101,209	20,538	93,429
16	-21,6	103,883	35,224	88,939

Проведенные численные расчеты показывают следующее:

- с увеличением высоты при одинаковой скорости ветра возрастает угол наклона кабеля к вертикали в верхней точке. Также значительно увеличивается горизонтальная составляющая силы, действующей от кабеля на БПЛА. Это означает, что платформа должна будет сильнее поворачиваться в сторону направления ветра, тем самым увеличивая площадь на которую оказывает давление ветер. Значительная часть мощности будет тратиться на сопротивление ветру;

- незначительное отклонение БПЛА от точки зависания не оказывает существенного влияния на длину кабеля и силу натяжения кабеля в верхней точке;

- изменение силы натяжения лебедки существенно меняет профиль кабеля и его длину;

- существенное влияние на необходимую силу тяги двигателей 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.

**В третьей главе** описана методология расчета необходимой для функционирования привязной беспилотной высотной платформы мощности, а также результаты численного расчета в зависимости от силы натяжения, взлетного веса, высоты подъема, типа двигателей и др.

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

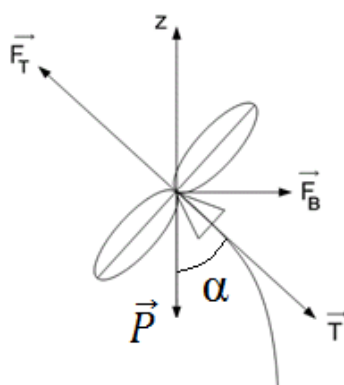


Рисунок 4. Силы, действующие на беспилотный летательный аппарат.

На рисунке 4 представлены силы, действующие на беспилотный высотный модуль в турбулентной атмосфере: сила тяжести действует с силой  $\vec{P}$  – взлетный вес БПЛА; сила сопротивления дрона ветру ( $\vec{F}_B$ ); сила натяжения кабеля ( $\vec{T}$ ), учитывающая также воздействие веса кабеля. Сумма этих сил определяет модуль и вектор необходимой силы тяги двигателей ( $\vec{F}_T$ ) для создания подъемной силы, удерживающей БПЛА в заданной точке:

$$-\vec{F}_T = \vec{F}_g + \vec{P} + \vec{T} \quad (27)$$

Модуль необходимой тяги двигателей рассчитывается по следующей формуле:

$$|\vec{F}_T| = \sqrt{(|\vec{P}| + |\vec{T}| \cdot \sin \alpha)^2 + (|\vec{F}_g| + |\vec{T}| \cdot \cos \alpha)^2} \quad (28)$$

Где  $\alpha$  – угол наклона силы натяжения к вертикали.

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

$$\vec{P} = m_1 \vec{g} + m_2 \vec{g}, \quad (29)$$

где  $m_1$  – собственная масса БПЛА;

$m_2$  – масса полезной нагрузки.

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

$$|\vec{F}_B| = C_x \cdot w \cdot S, \quad (30)$$

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  $\alpha$ . Для расчетов примем средние значения:  $C_x = 1.5$  и  $S = 1 \text{ м}^2$  (оценочная величина площади сечения БПЛА).

Нормальное ветровое давление на препятствие приближенно определяется по формуле:

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

где  $\rho$  – плотность воздуха, зависящая от его влажности, температуры и атмосферного давления ( $1.18415 \text{ кг/м}^3$ ),

$v$  – скорость ветра, м/с.

$$\text{Тогда } |\vec{F}_B| \approx 0.9 \cdot v^2 \quad (31)$$

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

$$W = \left| \frac{\vec{F}_T}{k \cdot g} \right|, \quad (32)$$

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

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

$\vec{g}$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

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

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.

Учитывая (27, 28, 29, 32) необходимую мощность для функционирования БПЛА можно рассчитать следующим образом:

$$W = \frac{\sqrt{(|m_1 \vec{g}| + |m_2 \vec{g}| + |\vec{T}| \cdot \sin \alpha)^2 + (|\vec{F}_g| + |\vec{T}| \cdot \cos \alpha)^2}}{k \cdot g} \quad (33)$$

Таким образом, определены все силы, необходимые для расчета мощности при функционировании беспилотной высотной платформы в условиях ветровых нагрузок. Далее приведена таблица с расчетом показателей необходимой мощности в зависимости от скорости ветра, взлетного веса БПЛА, силы натяжения кабеля лебедкой для выбранного типа двигателей:

Таблица 1. Расчет необходимой для функционирования БПЛА мощности, высота 75 м.

Скорость ветра, м/с	Взлетный вес БПЛА, кг	Сила натяжения кабеля лебедкой, Н	Необходимая мощность, кВт
0	25	10	3,14
		30	3,43
	30	10	3,87
		30	4,19
	35	10	4,66
		30	5
8	25	10	3,23

		30	3,52
	30	10	3,96
		30	4,27
	35	10	4,74
		30	5,08
16	25	10	4,52
		30	4,79
	30	10	5,16
		30	5,46
	35	10	5,87
		30	6,2

**В четвертой главе** описаны экспериментальные исследования характеристик привязной высотной беспилотной платформы, а также приведены результаты полевых испытаний. Экспериментальные исследования, подтверждающие приведенные выше теоретические результаты, были проведены с использованием разработанной с участием автора диссертации 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 100м в турбулентной атмосфере (скорость ветра до 15м/с).

Архитектура привязной платформы «Альбатрос» 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 до 8 кВт, 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.

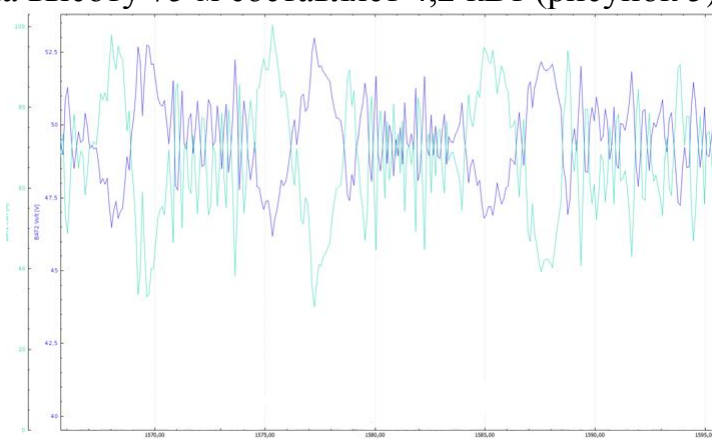
4. Бортовую аппаратуру полезной нагрузки в составе базовой станции сотовой сети четвертого поколения (LTE), радиолокационного и радиорелейного оборудования, аппаратуры видеонаблюдения и т.д.

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.

С использованием комплекса «Альбатрос» в полевых условиях для оценки требуемой мощности проведен ряд экспериментов при различных показателях высоты подъема, веса полезной нагрузки, скорости ветра, силы натяжения кабеля лебедкой. В основе электронного управления коптером использовался полётный контроллер с открытым исходным кодом PixHawk 2.1 Cube, с программным полетным стеком ArduPilot. Определение высоты полетным контроллером определяется исходя из значений показателей акселерометра, GPS и барометра. Для более точного измерения высоты использовался высотомер LightWare SF11/C Lidar, подключаемый Serial port к полётному контроллеру и обеспечивающий точное измерение высоты до 120м. Для удержания коптера в пространстве использовался GPS M8N, обеспечивающий связь по GPS и GLONASS. Для питания полетного контроллера использовался основной и резервный DC-DC преобразователи MAUCH PL4-14S/1, преобразующий рабочее бортовое напряжение 50V до необходимых полетному контроллеру 5,3V, также в преобразователях находились датчики тока и напряжения, с помощью которых происходило измерение тока и напряжения резервной батареи и преобразователя от наземного источника питания. В качестве передатчика использовался пульт управления Futaba T8FGS, а приемника, установленного на борту коптера Futaba R6208 SB. При функционировании привязной высотной беспилотной платформы в турбулентной атмосфере (скорость ветра до 8м/с) среднее значение мощности, передаваемой с земли на борт БПЛА, для поднятия 30 кг взлетного веса на высоту 75 м составляет 4,2 кВт (рисунок 5).



**Рисунок 5. Показатели тока и напряжения в эксперименте при подъеме в ветреную погоду на высоту 75 м.**

Указанные значения мощности определяются путем перемножения

средних показателей тока и напряжения, отображенных на гистограмме рисунка 6. Полученные экспериментальные результаты с достаточной для практики точностью (более 90%) совпадают с теоретическими результатами, описание которых приведено в предыдущих разделах.

**Пятая глава** посвящена описанию разработки программы по определению необходимой мощности для функционирования привязной высотной беспилотной платформы. Программа включает в себя реализацию алгоритма решения системы дифференциальных уравнений (25), приведенной во второй главе. Описываются основные этапы алгоритма вычислений на основе предложенного численного метода. Представлены оконные формы интерфейса программы (Одна из форм программного комплекса на рисунке 6).

Высота, м	75
Смещение, м	0
Плотность, кг/м	0.067
Аэродин. постоянная кг/м <sup>2</sup>	0.003
Скорость ветра в верхней точке, м/с	16
Местность	Сельская
Масса с нагрузкой, кг	30
Натяжение лебедки, Н	10

Рассчитать мощность

**Рисунок 6. Оконная форма программного комплекса.**

Алгоритмы разработанного численного метода реализованы в виде программы под управлением операционной системы Windows. Разработанное программное обеспечение зарегистрировано в Роспатенте, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611939 от 12.02.2020.

### **Основные результаты диссертационной работы**

Основные научные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

1. Построена математическая модель системы, включающей наземный комплекс управления, кевларовый кабель-трос с высоковольтными медными проводами и оптоволоконном и высоконадежный беспилотный летательный аппарат, находящийся в условиях турбулентной атмосферы.

2. Разработан метод и алгоритм решения системы дифференциальных уравнений, адекватно описывающей функционирование платформы при ветровых нагрузках, для расчета силы натяжения, являющейся одной из основных компонент при определении требуемой мощности энергии, передаваемой с земли на борт привязной высотной беспилотной платформы.

3. Разработана методология расчета величины мощности, определяющей выбор параметров всех компонент привязной платформы:

высотного беспилотного модуля, наземной и бортовой системы управления, системы передачи энергии земля-борт.

4. Разработан программный комплекс, реализующий алгоритмы расчета требуемой мощности для функционирования привязной высотной беспилотной платформы, находящейся в условиях турбулентной атмосферы;

5. Разработана методология проведения экспериментальных исследований по функционированию привязной высотной беспилотной платформы в условиях ветровых нагрузок.

6. Проведен сравнительный анализ теоретических результатов с результатами экспериментальных исследований, выполненных с использованием привязной беспилотной платформы «Альбатрос», который подтвердил высокую точность теоретических результатов.

### **Основные публикации по теме работы.**

#### **Издания из перечня Web of Science/Scopus:**

1. Vishnevsky, V.M., Mikhailov, E.A., Tumchenok, D.A., **Shirvanyan, A.M.** Mathematical Model of the Operation of a Tethered Unmanned Platform under Wind Loading // Mathematical Models and Computer Simulations. 2020. Vol. 12, No. 4. P. 492–502.

2. Vishnevsky, V.M., Tereschenko, B.N., Tumchenok, D.A., **Shirvanyan, A.M.**, Sokolov, A.M. Principles of building a power transmission system for tethered unmanned telecommunication platforms // Lecture Notes in Computer Science. 2019. Vol. 11965 P. 94-110.

3. Vishnevsky, V., Tereschenko, B., Tumchenok, D., **Shirvanyan, A.** 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.

4. Vishnevsky, V., Tumchenok, D., **Shirvanyan, A.** 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, 2019. P. 1-7.

5. Tumchenok, D., **Shirvanyan, A.** Formation of linearized map for a mobile robot in a real time / International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEASCS), 2015. P. 1-6.

#### **Статьи в журналах/сборниках из перечня ВАК:**

6. Вишневский В.М., **Ширванян А.М.**, Бряшко Н.Н. Расчет необходимой мощности для функционирования привязной беспилотной платформы в условиях турбулентной атмосферы // Информационные технологии и вычислительные системы. 2020. Т. 3. С. 71-84.

7. Вишневский В.М., Михайлов Е.А., Тумченко Д.А., **Ширванян А.М.** Математическая модель функционирования кабель-троса привязной беспилотной платформы при воздействии ветровых нагрузок // Математическое моделирование. 2019. №11 том 31. С. 61-78.

8. **Ширванян А.М.**, Тумченко Д.А. Линейное представление точечной карты препятствий для построения маршрута движения мобильного робототехнического комплекса // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. № 4. С. 64-71.

#### **Прочие публикации:**

9. Вишневский 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.

10. Вишневский В.М., Терещенко Б.Н., Тумченко Д.А., **Ширванян А.М.** Сравнительный анализ вариантов построения проводной системы передачи энергии земля-борт для привязных высотных телекоммуникационных платформ / Материалы 21-й Международной научной конференции "Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь" (DCCN-2018, Москва). М.: РУДН, 2018. С. 387-401.

11. Вишневский В.М., **Ширванян А.М.**, Тумченко Д.А. Математическая модель динамики функционирования привязной высотной телекоммуникационной платформы в условиях турбулентной атмосферы / Материалы 21-й Международной научной конференции "Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь" (DCCN-2018, Москва). М.: РУДН, 2018. С. 402-414.

12. Вишневский В.М., **Ширванян А.М.**, Тумченко Д.А. Оптимальная структура высоковольтного кабеля для передачи энергии с земли на борт привязной высотной беспилотной телекоммуникационной платформы / Proceedings of the 20th International Conference, Distributed Computer and Communication Networks (DCCN 2017, Moscow, Russia). Moscow, Russia: TECHNOSPHERA, 2017. С. 197-205.

13. Вишневский В.М., Тумченко Д.А., **Ширванян А.М.** Привязные высотные телекоммуникационные платформы: состояние и перспективы развития / Труды 11-й Международной отраслевой научной конференции «Технологии информационного общества» (Москва, 2017). М.: ООО "ИД Медиа Паблишер", 2017. С. 381-382.

14. **Ширванян А.М.**, Браништов С.А. Управление мобильным роботом в сложной нестационарной среде / Тезисы докладов 14-й Всероссийской научной конференцией "Нейрокомпьютеры и их применение" (Москва, 2016). М.: ГБОУ ВПО МГППУ, 2016. С. 86-87.

15. **Ширванян А.М.** Расчет необходимой мощности для функционирования привязной платформы / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611939 от 12.02.2020.