

Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования неразрушающего контроля
Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 004.31

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-40-50>

EDN ECAQGY



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Расчет основных эксплуатационных характеристик привязной высотной системы корабельного базирования

И.И. Давлюд[@]

Балтийское высшее военно-морское училище имени Ф.Ф. Ушакова, Калининград, 236022 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: sawefew2@yandex.ru

Резюме

Цели. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) активно применяются во многих военных и гражданских областях: мониторинг критических объектов, телекоммуникации, радиолокация, фото- и видеосъемка, картографирование и др. Основным недостатком автономных БПЛА является ограниченное время функционирования. Длительное функционирование БПЛА на кораблях могут обеспечить привязные высотные системы (ПВС), в которых электропитание двигателей и аппаратуры полезной нагрузки осуществляется от бортового источника энергии по тонкому кабель-тросу. Цель работы – выбор и обоснование облика ПВС, расчет необходимых эксплуатационных характеристик.

Методы. В работе используются методы системного и функционального анализа параметров привязной системы, методы и модели теории отношений и измерения.

Результаты. Рассмотрены вопросы проектирования и реализации нового поколения ПВС корабельного базирования. На основе существующих привязных платформ определен рациональный тип аэродинамической схемы БПЛА. Определена и обоснована оптимальная архитектура привязной системы, представлен ее облик и решение по размещению на корабле, а также описана ее работа. Выбраны и рассчитаны основные исходные параметры для проектирования высотных систем, такие как взлетная масса, оптимальная высота подъема, максимальная необходимая мощность для функционирования, структура системы передачи энергии, время развертывания и подъема на расчетную высоту.

Выводы. Представленная в статье методология расчета необходимых характеристик позволяет использовать ее для разработки и оценки ПВС. Данные системы способны выполнять различный спектр задач, при этом не требуя отдельного места хранения и запуска, что особенно актуально в корабельных условиях. Представленная система имеет значительные преимущества перед известными аналогами.

Ключевые слова: привязная высотная платформа, беспилотный аппарат, мощность, передача энергии, корабль, транспортно-пусковой контейнер

• Поступила: 23.11.2023 • Доработана: 04.03.2024 • Принята к опубликованию: 24.05.2024

Для цитирования: Давлюд И.И. Расчет основных эксплуатационных характеристик привязной высотной системы корабельного базирования. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):40–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-40-50>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Calculation of the main operational characteristics of a tethered high-altitude ship-based system

Igor I. Dawlyud[®]

Admiral F.F. Ushakov Baltic Higher Naval School, Kaliningrad, 236022 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: sawefew2@yandex.ru

Abstract

Objectives. Currently, UAVs are actively used in many military and civilian fields such as object surveillance, telecommunications, radar, photography, video recording, and mapping, etc. The main disadvantage of autonomous UAVs is their limited operating time. The long-term operation of UAVs on ships can be ensured by tethered high-altitude systems in which the power supply of engines and equipment is provided from the onboard energy source through a thin cable tether. This paper aims to select and justify the appearance of such system, as well as to calculate the required performance characteristics.

Methods. The study used methods of systemic and functional analysis of tethered system parameters, as well as methods and models of the theory of relations and measurement.

Results. The issues of design and implementation of new generation tethered high-altitude ship-based systems were considered. A rational type of aerodynamic design for unmanned aerial vehicles was determined based on existing tethered platforms. The optimal architecture of the tethered system was defined and justified. The paper presents the appearance and solution for placement onboard the ship, and describes its operation. The main initial parameters for designing high-altitude systems such as take-off weight, optimal lift altitude, maximum power required for operation, structure of the energy transfer system, as well as deployment and lift time to the design altitude were selected and calculated.

Conclusions. The methodology for calculating the necessary characteristics described in the paper can be used for developing and evaluating tethered high-altitude systems. These systems are capable of performing a wide range of tasks, without requiring a separate storage and launch location, which is especially important in the ship environment. The system presented herein possesses significant advantages over well-known analogues.

Keywords: tethered high-altitude platform, unmanned aerial vehicle, power, energy transfer, ship, transport and launch container

• Submitted: 23.11.2023 • Revised: 04.03.2024 • Accepted: 24.05.2024

For citation: Dawlyud I.I. Calculation of the main operational characteristics of a tethered high-altitude ship-based system. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):40–50. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-40-50>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение и интенсивное развитие получили беспилотные летательные аппараты (БПЛА) многороторного типа. БПЛА обладают массой неоспоримых достоинств – это простые и недорогие конструкции, в отличие от больших авиакомплексов; безопасность и неприхотливость в обслуживании; отсутствие необходимости в специальных стартовых площадках; оперативность. Основным недостатком БПЛА является малая (ограниченная) автономность полета, связанная с недостаточной

емкостью аккумуляторов БПЛА, оснащенных электродвигателями [1].

Длительное функционирование БПЛА можно обеспечить непрерывной подачей напряжения питания с помощью привязных высотных систем (ПВС). В таких системах передача энергии высокой мощности на БПЛА и его удержание на определенной высоте осуществляются с помощью тонкого кабельтроса [2]. Вместе с этим, ПВС обеспечивает возможность точной посадки БПЛА в назначенное место, что может быть использовано в местах с различными преградами (препятствиями), например, на палубе корабля.

В Военно-морском флоте (ВМФ) ПВС используются для организации видеонаблюдения, целеуказания, организации связи, радиоэлектронной борьбы и т.д. Однако массовое использование ПВС на кораблях в настоящее время затруднено ввиду отсутствия специализированных мест хранения, а также простых и надежных средств запуска и посадки [3].

РАЗРАБОТКА ОБЛИКА И РАСЧЕТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПВС

Разработка ПВС корабельного базирования требует проведения комплекса работ:

- определение архитектуры функционирования, облика, места хранения и запуска ПВС;
- расчет основных тактико-эксплуатационных характеристик;
- расчет параметров устойчивости к внешним возмущающим воздействиям.

В настоящее время в ВМФ проводится работа по поиску оптимального размещения на кораблях мест хранения, взлета и посадки ПВС, а также средств, обеспечивающих их эксплуатацию. В большинстве случаев это связано с необходимостью значительного изменения внешней и внутренней архитектуры корабля с целью поиска необходимых площадей [3]. Такой подход является неприемлемым для боевого корабля, поскольку при этом возможны существенные изменения его эксплуатационных и технических характеристик. Поэтому решение задачи хранения, взлета и посадки ПВС должно сводиться к необходимости поиска иных способов с применением специальных средств.

С точки зрения архитектуры перспективная ПВС представляет собой систему, состоящую из воздушного (БПЛА) и корабельного модулей, объединенных друг с другом гибкой связью (кабель-тросом) и размещенных в стандартном транспортно-пусковом контейнере (ТПК) для вертикальной пусковой установки корабля, находящейся под верхней палубой (рис. 1).

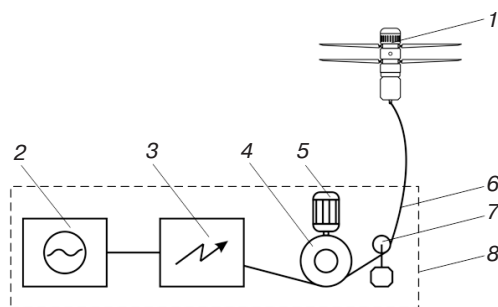


Рис. 1. Привязная высотная система корабельного базирования: 1 – воздушный модуль (БПЛА), 2 – источник переменного напряжения, 3 – преобразователь напряжения и система управления лебедкой, 4 – лебедка, 5 – привод лебедки, 6 – кабель-трос, 7 – датчик натяжения кабель-троса, 8 – корабельный модуль

Беспилотный летательный аппарат удерживает установленную на его борту полезную нагрузку в заданной точке над уровнем моря. Механическая связь БПЛА с корабельным модулем осуществляется посредством кабель-троса. В состав корабельного модуля входит источник переменного напряжения, преобразователь напряжения и система управления лебедкой, лебедка с приводом и датчик натяжения кабель-троса. Облик ПВС, размещенной в ТПК, представлен на рис. 2.

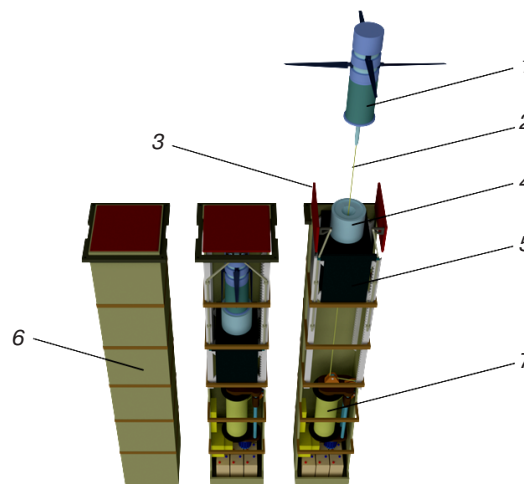


Рис. 2. Внешний вид ПВС в ТПК: 1 – БПЛА, 2 – кабель-трос, 3 – створки крышки, 4 – стакан, 5 – тумба, 6 – ТПК, 7 – лебедка

При выборе типа БПЛА следует учитывать условия эксплуатации и особенности его работы [4]. Зависимость пространственной ориентации БПЛА от силы и направления ветровой нагрузки должна быть сведена к минимуму. Поэтому для ПВС возможно использование трех аэродинамических схем: одновинтовая с несколькими рулевыми устройствами (рулевыми винтами), симметрично расположенными относительно оси несущего винта; соосная; мультироторная с четырьмя и более винтами, симметрично расположенными относительно центра БПЛА.

Все типы БПЛА имеют свои особенности и недостатки, однако, несмотря на относительную сложность конструкции, в ПВС выбрана соосная схема. Ее курсовая ориентация незначительно зависит от направления ветра, такой тип БПЛА проще хранить и запускать из контейнера, что является рациональным решением в заданных условиях.

Основными исходными расчетными параметрами при разработке ПВС являются:

- взлетная масса БПЛА, которая включает массу самого БПЛА, массу полезной нагрузки, массу кабель-троса;
- оптимальная высота подъема БПЛА;
- максимальная необходимая мощность для функционирования БПЛА;

- структура системы передачи энергии на БПЛА;
- время разворачивания и подъема БПЛА на установленную высоту.

ПВС работает следующим образом. В базе хранения на БПЛА устанавливают необходимую для выполнения конкретных задач полезную нагрузку. В корабельную вертикальную пусковую установку (рис. 2) загружают ТПК. Перед использованием устройства открывают крышку корабельной вертикальной пусковой установки. Затем с помощью привода открывают створки крышки ТПК, после чего поднимается стакан, жестко закрепленный на тумбе.

После подъема тумбы в крайнее верхнее положение запускаются винты БПЛА, приводимые в движение как минимум двумя электродвигателями, получающими питание по кабель-тросу. БПЛА начинает вертикальный подъем. Система управления формирует необходимое напряжение для привода лебедки, которая, вращаясь, разматывает кабель-трос, соединенный со штырем БПЛА через датчик натяжения, систему роликов и кабелеукладчик. Датчик натяжения необходим для поддержания установленной силы натяжения кабель-троса и предотвращения аварийных ситуаций посредством выработки сигналов для системы управления. Во время функционирования (подъема и зависания на определенной высоте) на БПЛА по кабель-тросу подается высокое напряжение питания от системы управления, которое снижается бортовым преобразователем до нужной величины для функционирования самого БПЛА и установленной на нем полезной нагрузки.

После набора высоты БПЛА стабилизируется относительно горизонта и курса с заданной точностью и удерживается в этом положении в процессе всей работы. Стабилизация БПЛА во время работы осуществляется автоматически с помощью системы датчиков: гироскопа, акселерометра, барометрического высотомера (альтиметра), трехкомпонентного магнитометра. Законы управления формируются с помощью микропроцессора и позволяют осуществлять стабилизацию курса, крена и тангажа, а также противостоять возмущающим воздействиям ветра. Компенсация сноса БПЛА из-за ветра или движения корабля осуществляется с помощью приемника глобальной навигационной системы и акселерометров. Компенсация вертикальных перемещений, вызванных волнением, осуществляется путем изменения длины кабель-троса по сигналам от бортовых датчиков и системы управления.

При аварийной ситуации или отсутствии питания с корабельного источника предусмотрено питание от аккумуляторов, расположенных в донной части ТПК. В случае обрыва кабель-троса предусмотрен автоматический режим аварийной посадки БПЛА с использованием энергии бортового аккумулятора.

Посадка БПЛА производится в обратной последовательности. При этом постоянное натяжение кабель-троса обеспечивает выравнивание БПЛА над стаканом. Развертывание, взлет, посадка и свертывание корабельной привязной высотной системы осуществляются автоматически.

ВЗЛЕТНАЯ МАССА

При проектировании ПВС важным параметром является максимальная взлетная масса БПЛА – масса БПЛА с установленной полезной нагрузкой и массой кабель-троса максимально возможной длины:

$$m_{вз} = m_{БПЛА} + m_{пн} + m_{кт} h, \quad (1)$$

где $m_{БПЛА}$ – масса БПЛА, $m_{пн}$ – масса полезной нагрузки, $m_{кт}$ – погонная масса кабель-троса, h – высота подъема БПЛА.

В формуле (1) неизвестной величиной является последнее слагаемое, которое зависит от используемого кабель-троса и высоты подъема. Кабель-трос может состоять из кабеля с несущим тросом или кабеля, отдельно прикрепленного к несущему тросу (рис. 3).

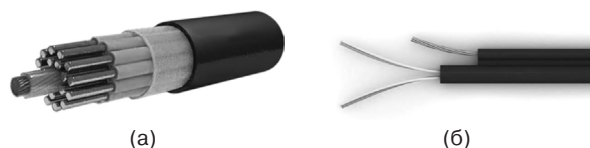


Рис. 3. Варианты кабель-тросов: (а) силовой тросовый кабель КПВЛС¹, (б) тросовый кабель УТР²

Первый вариант является предпочтительным, поскольку имеет более компактную и удобную в эксплуатации конструкцию. Технология производства кабель-троса предполагает использование в его центре силового троса в изоляции, а вокруг – изолированных проводов с медными токопроводящими жилами круглого сечения. Внешняя защитная оболочка кабель-троса состоит из изоляционного материала. Внутри внешней оболочки кабеля присутствуют пустоты, которые необходимо заполнять материалом малой плотности, чтобы придать конструкции устойчивость к смятию.

Основными материалами, используемыми при изготовлении кабель-троса, являются медь, кевлар,

¹ К – кабель контрольный, П – изоляция жил из полиэтилена, В – оболочка из поливинилхлоридного пластика, Л – лифтовой, С – с грузонесущим тросом из синтетических нитей. [C is control cable, P is polyethylene core insulation, V is polyvinyl chloride plastic sheath, L is lifting cable, and S means with load-carrying tether made of synthetic threads.]

² UTP, unshielded twisted pair – неэкранированная витая пара. [UTP is the unshielded twisted pair.]

оптоволокно, пластмассы. Погонная масса кабеля определяется по формуле:

$$m_{\text{КТ}} = \rho_{\text{К}} S_{\text{Т}} + \rho_{\text{М}} S_{\text{М}} u_{\text{М}} n + \rho_{\text{И}} S_{\text{И}} + \rho_{\text{О}} S_{\text{О}} + \rho_{\text{З}} S_{\text{З}} + \rho_{\text{ОВ}} S_{\text{ОВ}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{К}}$, $\rho_{\text{М}}$, $\rho_{\text{И}}$, $\rho_{\text{О}}$, $\rho_{\text{З}}$, $\rho_{\text{ОВ}}$ – плотность кевлара, меди, изоляции, оболочки, материала заполнения, оптоволокна, соответственно; $u_{\text{М}}$ – коэффициент, учитывающий скрутку проволоки в токопроводящей жиле; $S_{\text{Т}}$, $S_{\text{М}}$, $S_{\text{И}}$, $S_{\text{О}}$, $S_{\text{З}}$, $S_{\text{ОВ}}$ – площади сечений троса, медной жилы, изоляции, оболочки, заполнения, оптоволокна, соответственно; n – количество медных жил.

Для дальнейших расчетов примем следующие ограничения:

- оптоволокно однородно по всему сечению;
- внешняя оболочка имеет круглое сечение;
- толщина и материал изоляций всех жил и троса одинакова;
- все жилы имеют одинаковое поперечное сечение.

Упрощенный вариант поперечного сечения кабель-троса с двумя медными жилами и оптоволоконном представлен на рис. 4.

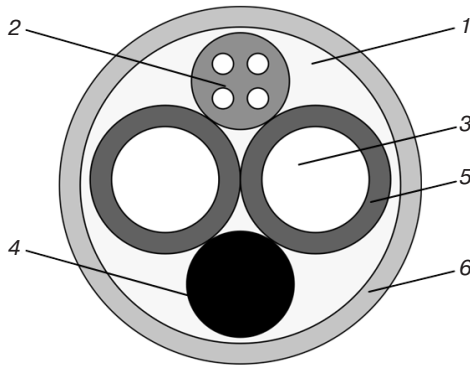


Рис. 4. Поперечный разрез кабель-троса: 1 – материал заполнения, 2 – оптоволокно, 3 – медная жила, 4 – кевларовый трос, 5 – изоляция, 6 – оболочка

Площадь изоляции $S_{\text{И}}$ находится по формуле:

$$S_{\text{И}} = 2\pi k_{\text{И}} (r_{\text{пр}} - k_{\text{И}} / 2)(n + 1), \quad (3)$$

где $k_{\text{И}}$ – толщина изоляции, $r_{\text{пр}}$ – радиус проводника.

Площадь оболочки определяется:

$$S_{\text{О}} = 2\pi k_{\text{О}} (r_{\text{КТ}} - k_{\text{О}} / 2), \quad (4)$$

где $k_{\text{О}}$ – толщина оболочки, $r_{\text{КТ}}$ – радиус кабель-троса.

Радиус рассматриваемого кабель-троса находится по формуле:

$$r_{\text{КТ}} = k_{\text{О}} + 3k_{\text{И}} + 2r_{\text{М}} + r_{\text{Т}}, \quad (5)$$

где $r_{\text{Т}}$ – радиус троса, $r_{\text{М}}$ – радиус медной жилы.

Форма поперечного сечения заполняющего материала имеет сложную форму, поэтому площадь его определяется выражением:

$$S_{\text{З}} = \pi r_{\text{КТ}}^2 - \pi (r_{\text{Т}}^2 u_{\text{Т}} + r_{\text{М}}^2 u_{\text{М}} n + 2k_{\text{И}} (r_{\text{пр}} - k_{\text{И}} / 2) \times (n + 1) + r_{\text{ОВ}}^2 + 2k_{\text{О}} (r_{\text{КТ}} - k_{\text{О}} / 2)), \quad (6)$$

где $r_{\text{ОВ}}$ – радиус оптоволокна.

После преобразования выражения (6) получим:

$$S_{\text{З}} = \pi ((r_{\text{КТ}} - k_{\text{О}})^2 - ((r_{\text{Т}} + k_{\text{И}})^2 u_{\text{Т}} + r_{\text{пр}}^2 u_{\text{М}} n + r_{\text{ОВ}}^2)). \quad (7)$$

Подставив в (2) уравнения (3), (4), (7), получим:

$$m_{\text{КТ}} = \rho_{\text{К}} \pi r_{\text{Т}}^2 + \rho_{\text{М}} \pi r_{\text{М}}^2 u_{\text{М}} n + \rho_{\text{И}} 2\pi k_{\text{И}} (r_{\text{пр}} - k_{\text{И}} / 2)(n + 1) + \rho_{\text{О}} 2\pi k_{\text{О}} (r_{\text{КТ}} - k_{\text{О}} / 2) + \rho_{\text{З}} (\pi ((r_{\text{КТ}} - k_{\text{О}})^2 - ((r_{\text{Т}} + k_{\text{И}})^2 u_{\text{Т}} + r_{\text{пр}}^2 u_{\text{М}} n + r_{\text{ОВ}}^2))) + \rho_{\text{ОВ}} \pi r_{\text{ОВ}}^2. \quad (8)$$

Полагая $r_{\text{Т}} = 0.0015$ м, $r_{\text{М}} = 0.00075$ м, $r_{\text{ОВ}} = 0.001$ м, $r_{\text{пр}} = 0.00155$ м, $k_{\text{И}} = k_{\text{О}} = 0.0008$ м, получим $m_{\text{КТ}} = 0.09$ кг. Таким образом, при высоте 100 м масса БПЛА с кабель-тросом увеличится на 9 кг.

ОПТИМАЛЬНАЯ ВЫСОТА ПОДЪЕМА БПЛА

От высоты подъема БПЛА напрямую зависит эффективность функционирования подвешенного оборудования ПВС: чем больше высота – тем больше обзор.

Предельная дальность радиолокации ограничена прямой видимостью до цели, значение которой (в км) определяется известной формулой (вывод из основной формулы радиолокации [5]):

$$L_{\text{max}} \approx 4.12 (\sqrt{h_{\text{а}}} + \sqrt{h_{\text{ц}}}), \quad (9)$$

где $h_{\text{а}}$ – высота антенны (высота подъема БПЛА), $h_{\text{ц}}$ – высота цели.

При высоте цели $h_{\text{ц}} = 0$ (например, малоразмерная надводная цель) и наблюдении с верхней палубы корабля ($h_{\text{а}} \approx 10$ м) дальность обнаружения составит $L_{\text{max}} \approx 13$ км. Однако при подъеме средств наблюдения на высоту $h_{\text{а}} \approx 100$ м предельная дальность возрастает более чем в 3 раза: $L_{\text{max}} \approx 41$ км. Зависимость дальности видимости горизонта от высоты наблюдения представлена на рис. 5.

Однако при увеличении высоты подъема БПЛА увеличивается потребляемая им мощность, а также скорость ветра [6]. Сравнивая результаты моделирования условий применения ПВС [7, 8], можно сделать вывод, что рациональная высота подъема составляет около 100 м.

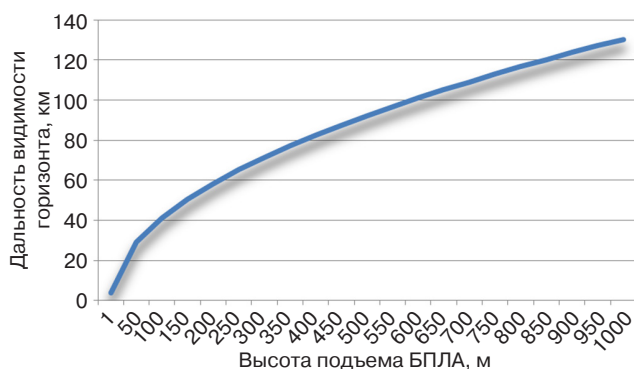


Рис. 5. Зависимость дальности видимости горизонта от высоты наблюдения

МАКСИМАЛЬНАЯ НЕОБХОДИМАЯ МОЩНОСТЬ ДЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БПЛА

На рис. 6 представлен подвесной БПЛА и действующие на него силы: F_g — сила тяжести, F_T — сила тяги двигателей БПЛА, $F_{св}$ — сила сопротивления ветру, $F_{кт}$ — сила натяжения кабель-троса.

Модуль всех сил, действующих на БПЛА, рассчитывается по формуле [6]:

$$|F_T| = \sqrt{(|F_g| + |F_{кт}| \cos \alpha)^2 + (|F_{св}| + |F_{кт}| \sin \alpha)^2}, \quad (10)$$

где α — угол вектора силы натяжения кабель-троса к вертикали.

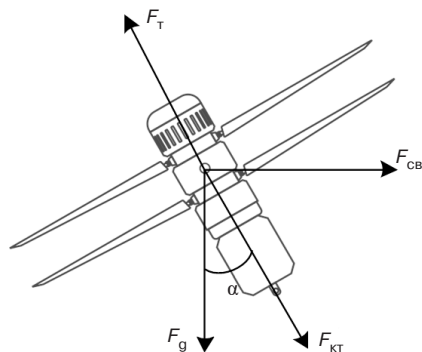


Рис. 6. БПЛА с действующими на него силами

Сила тяжести определяется взлетным весом БПЛА:

$$F_g = m_{\text{БПЛА}} g + m_{\text{пн}} g + m_{\text{кт}} g, \quad (11)$$

где g — ускорение свободного падения.

Сила сопротивления ветра находится по формуле³:

$$F_{св} = C \rho S v^2 = C q S, \quad (12)$$

где C — аэродинамический коэффициент, S — проекция площади БПЛА на направление, перпендикулярное

³ ОСТ 92-9249-80. Отраслевой стандарт. *Агрегаты специального назначения. Методика расчета ветровых нагрузок.* 1980. [OST 92-9249-80. Industry standard. *Units of special purpose. Calculation methodology for wind loads.* 1980 (in Russ.).]

набегающему потоку, v — скорость набегающего воздушного потока, ρ — плотность воздуха, q — ветровой напор.

Как следует из (12), для определения ветровых нагрузок необходимо знать геометрические характеристики БПЛА, скоростной напор и аэродинамический коэффициент. Геометрические характеристики и аэродинамический коэффициент являются известными величинами.

Рассмотрим аэродинамические нагрузки при ветровом воздействии: рабочие и предельные. При рабочем ветровом воздействии допускается эксплуатация БПЛА без ограничительных условий. При предельном ветровом воздействии БПЛА должен сохранять прочность, устойчивость и обеспечивать другие эксплуатационные требования.

Задаваемыми параметрами при рабочем ветровом воздействии являются расчетная максимальная величина средней (с двухминутным периодом осреднения) скорости ветра на высоте 10 м от поверхности земли и минимальная температура окружающей среды, при которых допускается эксплуатация БПЛА.

Расчетный скоростной напор при рабочем воздействии определяется по формуле:

$$q_p = \frac{\rho v_p^2}{2}, \quad (13)$$

где v_p — расчетная средняя скорость ветра при рабочем воздействии.

При расчете ветровой нагрузки на движущемся корабле необходимо учитывать скорость его передвижения, если она превышает $0.025 v_p$. В таком случае для заданной средней скорости ветра расчетный скоростной напор при движении против ветра определяется по формуле:

$$q_p = \frac{\rho (v_p + v_{\max})^2}{2}, \quad (14)$$

где $v_{\max}$ — максимальная скорость движения корабля.

По предельной величине нормативного среднего скоростного напора $q_{\text{п}}$ определяется расчетный скоростной напор для предельного ветрового воздействия:

$$q_p = q_{\text{п}} \mu, \quad (15)$$

где μ — коэффициент перегрузки, принимаемый равным 1.0–1.3.

Коэффициент C_i зависит от угла α , направления ветра и профиля БПЛА⁴.

Мощность двигателей, необходимая для удержания БПЛА в заданной точке, после определения модуля результирующей силы, рассчитывается по формуле:

⁴ Albisser M. *Identification of Aerodynamic Coefficients from Free-Flight Data.* Université de Lorraine, Nancy, France, Ph.D. Thesis, 2015.

$$P = \frac{|\mathbf{F}_T|}{k \times g}, \quad (16)$$

где $|\mathbf{F}_T|/g$ – суммарная тяга двигателей БПЛА; k – коэффициент эффективности винтомоторной группы, характеризующий отношение суммарной тяги двигателя к его мощности.

Из практики реализации ПВС и выбора винтомоторной группы известно, что достаточно хорошим значением коэффициента эффективности считается $k = 10$ кг/кВт и выше. Это означает, что на каждый киловатт затраченной энергии можно поднимать 10 кг нагрузки. Значение коэффициента эффективности в значительной мере зависит от типа двигателей и характеристик тяговых винтов. Для ПВС с увеличением высоты подъема увеличивается вес нагрузки (за счет увеличения силы натяжения кабель-троса), и соответственно эффективность винтомоторной группы снижается⁵.

Расчет силы натяжения ($F_{\text{кт}}$), действующей со стороны кабель-троса на ПВС, описан в [9] и представляет собой систему дифференциальных уравнений, одно из которых является линейным дифференциальным уравнением первого порядка, а два других – нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка. Следует отметить, что полученная система дифференциальных уравнений совпадает с уравнением положения гибкой нити [10] для привязного летательного объекта:

$$\begin{cases} \frac{dF_{\text{кт}}}{dz} - \rho_{\text{кт}}g = 0, \\ F_{\text{кт}} \frac{d^2x}{dz^2} + \rho_{\text{кт}}g \frac{dx}{dz} \left(1 + \left(\frac{dx}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dz} \right)^2 \right) + \\ + A \sqrt{v_x^2(z) + v_y^2(z) + \left(v_x(z) \frac{dy}{dz} - v_y(z) \frac{dx}{dz} \right)^2} \times \\ \times v_x(z) \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dz} \right)^2} = 0, \\ F_{\text{кт}} \frac{d^2y}{dz^2} + \rho_{\text{кт}}g \frac{dy}{dz} \left(1 + \left(\frac{dx}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dz} \right)^2 \right) + \\ + A \sqrt{v_x^2(z) + v_y^2(z) + \left(v_x(z) \frac{dy}{dz} - v_y(z) \frac{dx}{dz} \right)^2} \times \\ \times v_y(z) \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dz} \right)^2} = 0, \end{cases} \quad (17)$$

⁵ XRotor 8 Series Power Combo for Agricultral Drones. <https://www.hobbywing.com/en/products/xrotor-6-series-power-combo-for-agricultral-drones226.html>. Дата обращения 11.05.2023. / Accessed May 11, 2023.

где A – коэффициент аэродинамического сопротивления; $\rho_{\text{кт}}$ – линейная плотность кабель-троса; x, y, z – прямоугольная система координат; v_x, v_y, v_z – проекции скорости ветра на соответствующие оси прямоугольной системы координат.

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 [11].

С учетом (10), (11), (16), (17), необходимая мощность для функционирования ПВС определяется следующим образом:

$$P = \frac{\sqrt{(m_{\text{БПЛА}}g + m_{\text{пн}}g + |\mathbf{F}_{\text{кт}}|\sin\alpha)^2 + (|\mathbf{F}_{\text{св}}| + |\mathbf{F}_{\text{кт}}|\cos\alpha)^2}}{k \times g}. \quad (18)$$

В диссертации А.М. Ширванян⁶ представлен расчет необходимой мощности для функционирования ПВС массой 25 кг и 35 кг на высоте 75 м при действии силы натяжения $F_{\text{кт}} = 10$ Н и 30 Н (рис. 7). Исходя из этого, можно заключить, что существенное влияние на необходимую мощность оказывает высокая скорость ветра и движение корабля. При увеличении скорости ветра (и/или движения корабля) увеличивается угол наклона α действия силы натяжения кабель-троса $F_{\text{кт}}$ на ПВС, что увеличивает горизонтальную составляющую силы натяжения. Кроме того, изменение силы натяжения кабель-троса лебедкой существенно меняет его профиль и длину.

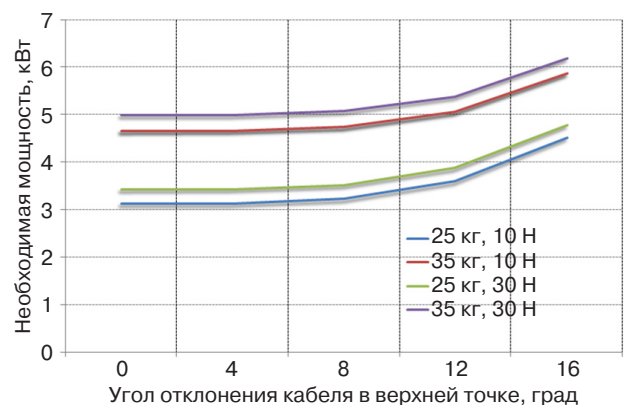


Рис. 7. Зависимость необходимой мощности ПВС от скорости ветра при разной массе и силе натяжения кабель-троса

⁶ Ширванян А.М. Разработка и исследование математической модели привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ, функционирующих при ветровых нагрузках: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. М., 2020. 116 с. [Shirvanyan A.M. Development and research for the mathematical model of the tethered high-altitude unmanned telecommunication platforms functioning at wind loads. Cand. Sci. Thesis (Eng.). Moscow, 2020, 116 p. (in Russ.).]

Для системы управления приводом лебедки кабель-троса важно найти баланс между силой натяжения кабель-троса лебедкой и затрачиваемой мощностью БПЛА. Слабое натяжение лебедки может спровоцировать большой выпуск кабель-троса, что небезопасно в корабельных условиях. Сильное натяжение лебедкой делает профиль кабеля практически вертикальным, но при этом существенно увеличивает необходимую для функционирования мощность БПЛА.

Полученные данные важны для оценки максимальной массы полезной нагрузки и необходимой передаваемой с корабля на БПЛА электрической энергии в условиях ветровых нагрузок и движения корабля, а также при проектировании системы управления позиционированием ПВС.

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ НА БПЛА

Для эффективной эксплуатации ПВС необходима подача энергии большой мощности. В настоящее время существуют эффективные системы электроснабжения БПЛА, выполненные на основе постоянного или переменного тока высокой частоты. Выбору рода тока питания подвесных систем посвящено большое количество материалов [12–15]. При питании переменным током можно получить относительно высокий КПД и меньшую площадь сечения проводников в сравнении с постоянным током. Однако в длинной линии питания неизбежно возникают волновые процессы, заключающиеся в возникновении отраженной волны, что приводит к повышению напряжения на некоторых участках

кабель-троса. В свернутом состоянии (на барабане лебедки) катушка с кабель-тросом представляет собой индуктивное сопротивление, что также препятствует передаче переменного тока. Вместе с этим, передача электроэнергии на промышленной частоте приводит к необходимости организации преобразования, что снижает массу полезной нагрузки.

При одинаковой мощности с увеличением напряжения питания уменьшается площадь сечения проводника, поэтому для питания БПЛА по кабель-тросу необходимо передавать высокое напряжение. Структура схемы питания представлена на рис. 8.

Максимальная передаваемая по кабель-тросу мощность будет зависеть от рода тока. Для расчета максимальной передаваемой мощности необходимо определить диаметр (площадь сечения) провода, плотность тока, межпроводное напряжение (для постоянного тока), волновое сопротивление (для переменного тока).

Мощность постоянного тока находится по формуле:

$$P_{\text{пост}} = IU = \pi \frac{d_M^2}{4} JU, \quad (19)$$

где I – сила тока, d_M – диаметр жилы медного провода, J – плотность тока, U – межпроводное напряжение.

Погонные потери в проводах определяются по формуле [16]:

$$\Delta_{\text{пост}} = 2S_M J^2 \sigma, \quad (20)$$

где σ – проводимость материала проводника.

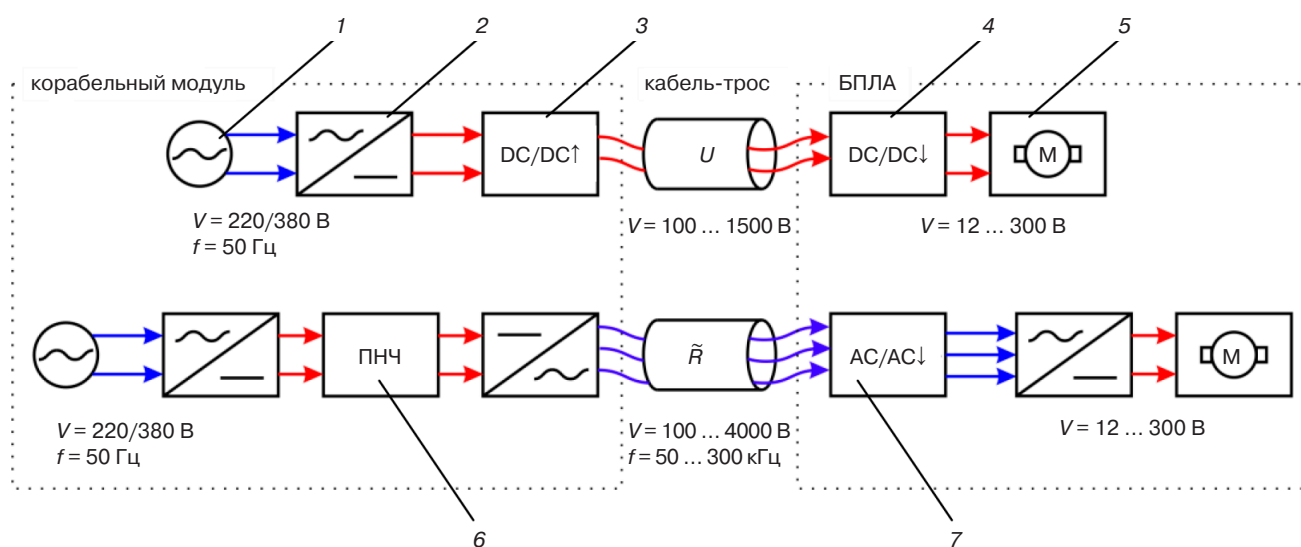


Рис. 8. Структура схемы питания ПВС: 1 – источник переменного напряжения, 2 – выпрямитель, 3 – повышающий преобразователь постоянного тока, 4 – DC-DC конвертер (преобразователь напряжения постоянного тока, direct current), 5 – потребитель БПЛА и полезной нагрузки (М – электрический мотор), 6 – преобразователь низкой частоты, 7 – понижающий преобразователь переменного тока (alternating current, AC). $\tilde{R}$ – волновое сопротивление линии из двух проводников, V – напряжение, f – частота

При построении системы питания на переменном токе отраженные волны будут переносить энергию от точки соединения линии с нагрузкой обратно в источник энергии. Условием максимальной эффективности передачи энергии переменным током является равенство волнового сопротивления линии сопротивлению нагрузки линии. Максимальная передаваемая мощность определяется следующим образом:

$$P_{\text{пер}} = I^2 \tilde{R} = I^2 \frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{l_m}{r_m}, \quad (21)$$

где $\tilde{R}$ – волновое сопротивление линии из двух проводников, l_m – расстояние между центрами двух проводников, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды между проводниками.

Погонные потери мощности при переменном токе определяются по формуле:

$$\Delta_{\text{пер}} = 2S_m \sigma (K_s J)^2, \quad (22)$$

где K_s – коэффициент использования сечения.

Таким образом, при сравнении (20) и (22) видно, что погонные потери мощности при передаче переменным током меньше, чем при передаче постоянным током, вследствие влияния скин-эффекта. При использовании кабеля с $d_m > 6$ мм существенно возрастает максимально возможная мощность при переменном токе. Например, при $d_m = 8$ мм и напряжении 1200 В можно передать 48 кВт постоянного тока, в то же время при переменном токе – 135 кВт.

В [17] установлено, что незначительное увеличение радиуса токопроводящей жилы r_m дает большое увеличение передаваемой мощности, уменьшая долю затрат, необходимую для подъема и удержания кабель-троса. При меньшем радиусе токопроводящей жилы максимальная мощность несущественно зависит от рода тока. Таким образом, передача большой мощности (свыше 14 кВт) переменным током предпочтительней, а при меньших мощностях будет целесообразнее использование постоянного тока.

ВРЕМЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ И ПОДЪЕМ БПЛА НА УСТАНОВЛЕННУЮ ВЫСОТУ

Размещение ПВС в ТПК помимо очевидных плюсов имеет существенный недостаток. Транспортно-пусковой контейнер загружен в вертикальную пусковую установку, где находятся средства поражения различного типа и назначения. Эксплуатация развернутой ПВС частично или полностью блокирует использование данных средств, т.к. на пути их траектории может быть кабель-трос ПВС или БПЛА. Поэтому расчет времени развертывания (свертывания) имеет важное значение при эксплуатации ПВС на кораблях ВМФ. Время развертывания рассчитывается по следующей формуле:

$$t_p = t_{\text{пс}} + h / v_{\text{сп}}, \quad (23)$$

где $t_{\text{пс}}$ – время подъема (спуска) платформы с БПЛА в ТПК, $v_{\text{сп}}$ – скорость спуска (подъема) БПЛА.

При $t_{\text{пс}} = 5$ с, $v_{\text{сп}} = 4$ м/с время свертывания с высоты 100 м составит 30 с.

Для сравнения: привязной БПЛА ЕТОР (Israel Aerospace Industries, Израиль) с максимальной полезной нагрузкой 20 кг и высотой подъема 100 м имеет сопоставимое время развертывания [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация рассмотренных принципов построения ПВС позволит создать комплекс, способный с высокой эффективностью выполнять различные задачи. Разрабатываемая ПВС имеет значительные преимущества перед известными платформами: контейнерное хранение и запуск, система передачи энергии большой мощности по кабель-тросу малого сечения (малой погонной массы), стабилизация БПЛА с полезной нагрузкой по высоте. Вместе с этим перспективная ПВС обеспечивает подъем полезной нагрузки на высоту 100 м с длительным сроком функционирования, ограниченным лишь характеристиками надежности ПВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khofiyah N.A., Maret S., Sutopo W., Nugroho B.D.A. Goldsmith's Commercialization Model for Feasibility Study of Technology Lithium Battery Pack Drone. In: *2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*. IEEE; 2018. P. 147–151. <https://doi.org/10.1109/ICEVT.2018.8628439>
2. Zikou L., Papachristos C., Tzes A. The Power-over-Tether system for powering small UAVs: Tethering-line tension control synthesis. In: *Proceedings of the 2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. IEEE; 2015. P. 681–687. <https://doi.org/10.1109/MED.2015.7158825>
3. Соловьева В.В., Шаров С.Н. Судовые взлетные и посадочные устройства беспилотных летательных аппаратов. *Морской вестник*. 2015;1(53):65–69. URL: <https://www.elibrary.ru/tjxpif>

4. Вишневский В.М. Методы и алгоритмы проектирования и реализации привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ. В сб.: *XIII Всероссийское совещание по проблемам управления: Сборник трудов. (ВСПУ – 2019)*. М.: Институт проблем управления; 2019. С. 40–42. URL: <https://vspu2019.ipu.ru/proceedings/0040.pdf>
5. Ботов М.И., Вяхирев В.А. *Основы теории радиолокационных систем и комплексов*. Красноярск: Сиб. федер. ун-т; 2013. 530 с. URL: https://vii.sfu-kras.ru/images/libs/Osnovi_teorii.pdf
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;3:71–84. <https://doi.org/10.14357/20718632200307>
7. Лопухов А.А., Осипов Ю.Н., Ершов В.И., Симанов С.Е. Особенности формирования полезной нагрузки и технического облика беспилотной авиационной системы ретрансляции сигналов управления для наземных робототехнических комплексов. *Актуальные вопросы пожарной безопасности*. 2022;2(12):33–40. <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2022.40.70.004>
8. Wang G., Samarathunga W., Wang S. Uninterruptible Power Supply Design for Heavy Payload Tethered Hexarotors. *Int. J. Emerging Eng. Res. Technol.* 2016;4(2):16–21.
9. Вишневский В.М., Ширванян А.М., Тумченко Д.А. Математическая модель динамики функционирования привязной высотной телекоммуникационной платформы в условиях турбулентной атмосферы. В сб.: *Распределительные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь. Материалы 21 Международной научной конференции DCCN-2018*. М.: РУДН; 2018. С. 402–414.
10. Меркин Д.Р. *Введение в механику гибкой нити*. М.: Наука; 1980. 240 с.
11. Tognon M., Franchi A. Theory and Applications for Control of Aerial Robots in Physical Interaction Through Tethers. Part of the book series: *Springer Tracts in Advanced Robotics*. (STAR, vol. 140). Cham, Switzerland: Springer; 2021. 156 p.
12. Вишневский В.М., Тумченко Д.А., Ширванян А.М. Оптимальная структура высоковольтного кабеля для передачи энергии с земли на борт привязной высотной беспилотной телекоммуникационной платформы. В сб.: *Распределительные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь. Материалы 20 Международной научной конференции DCCN-2017*. М.: Техносфера; 2017. С. 197–205.
13. Герасимов В.А., Комлев А.В., Найдено Н.А., Филоженко А.Ю. Исследование и разработка системы энергообеспечения привязного подводного робота с модернизированным источником электропитания. *Подводные исследования и робототехника*. 2021;3(37):82–89. https://doi.org/10.37102/1992-4429_2021_37_03_08
14. Масюков М.В., Лукашов П.П. *Привязная мониторинговая платформа с системой питания*: пат. № 2724509 РФ. Заявка № 2019106709; заявл. 11.03.2019; опубл. 23.06.2020.
15. Ахобадзе Г.Н. *Система электроснабжения привязного летательного аппарата*: пат. № 2782805 РФ. Заявка № 2022116012; заявл. 14.06.2022; опубл. 02.11.2022.
16. 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. В сб.: *Распределительные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь. Материалы 21 Международной научной конференции DCCN-2018*. М.: РУДН; 2018. С. 387–401.
17. Нгуен Т.Л., Кузин Н.А., Юрков Н.К. К проблеме формирования облика перспективных беспилотных летательных аппаратов. *Надежность и качество сложных систем*. 2022;1(37):55–66. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2022-1-7>

REFERENCES

1. Khofiyah N.A., Maret S., Sutopo W., Nugroho B.D.A. Goldsmith's Commercialization Model for Feasibility Study of Technology Lithium Battery Pack Drone. In: *2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*. IEEE; 2018. P. 147–151. <https://doi.org/10.1109/ICEVT.2018.8628439>
2. Zikou L., Papachristos C., Tzes A. The Power-over-Tether system for powering small UAVs: Tethering-line tension control synthesis. In: *Proceedings of the 2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. IEEE; 2015. P. 681–687. <https://doi.org/10.1109/MED.2015.7158825>
3. Solovyeva V.V., Sharov S.N. Shipping take-off and alighting gears of unmanned flying vehicles. *Morskoy Vestnik*. 2015;1(53):65–69 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/tjxpif>
4. Vishnevskii V.M. Methods and algorithms for designing tethered high-altitude unmanned telecommunication platforms. In: *The 13th All-Russian Conference on Management Problems: Collection of Proceedings. (VSPU 2019)*. Moscow: Institute of Control Science RAS; 2019. P. 40–42 (in Russ.). Available from URL: <https://vspu2019.ipu.ru/proceedings/0040.pdf>
5. Botov M.I., Vyakhirev V.A. *Osnovy teorii radiolokatsionnykh sistem i kompleksov (Fundamentals of the Theory of Radar Systems and Complexes)*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2013. 530 p. (in Russ.). Available from URL: https://vii.sfu-kras.ru/images/libs/Osnovi_teorii.pdf
6. Vishnevsky V.M., Shirvanyan A.M., Bryashko N.N. Calculation of the required power for the operation of a tethered unmanned platform in a turbulent atmosphere. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2020;3:71–84 (in Russ.). <https://doi.org/10.14357/20718632200307>
7. Lopukhov A.A., Osipov YU.N., Ershov V.I., Simanov S.E. Formation features of effective load and technical characteristics of unmanned aircraft system of signal retranslation for ground-robotic systems control. *Aktual'nye voprosy pozharnoi bezopasnosti = Current Fire Safety Issues*. 2022;2(12):33–40 (in Russ.). <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2022.40.70.004>

8. Wang G., Samarathunga W., Wang S. Uninterruptible Power Supply Design for Heavy Payload Tethered Hexarotors. *Int. J. Emerging Eng. Res. Technol.* 2016;4(2):16–21.
9. Vishnevsky V.M., Shirvanyan A.M., Tumchenok D.A. Mathematical model of the dynamics of functioning of a tethered high-altitude telecommunications platform in a turbulent atmosphere. In: *Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. Proceedings of the 21st International Scientific Conference DCCN 2018*. Moscow: RUDN University; 2018. P. 402–414 (in Russ.).
10. Merkin D.R. *Vvedenie v mekhaniku gibkoi niti (Introduction to Flexible Filament Mechanics)*. Moscow: Nauka; 1980. 240 p. (in Russ.).
11. Tognon M., Franchi A. *Theory and Applications for Control of Aerial Robots in Physical Interaction Through Tethers*. Part of the book series: *Springer Tracts in Advanced Robotics*. (STAR, vol. 140). Cham, Switzerland: Springer; 2021. 156 p.
12. Vishnevsky V.M., Tumchenok D.A., Shirvanyan A.M.M. Optimal structure of a high-voltage cable for transmitting energy from the ground to a tethered high-altitude unmanned telecommunications platform. In: *Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. Proceedings of the 20 International Scientific Conference DCCN 2017*. Moscow: Tekhnosfera; 2017. P. 197–205 (in Russ.).
13. Gerasimov V.A., Komlev A.V., Naidenko N.A., Filozhenko A.Yu. Research and development of an energy supply system for a tethered underwater robot with an upgraded power source. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Investigations and Robotics*. 2021;3(37):82–89 (in Russ.). https://doi.org/10.37102/1992-4429_2021_37_03_08
14. Masyukov M.V., Lukashov P.P. *Tethered Monitoring Platform with Power System*: RF Pat. 2724509. Publ. 2020.06.23 (in Russ.).
15. Akhobadze G.N. *Electrical Supply System for Tethered Aircraft*: RF Pat. 2782805. Publ. 2022.11.02 (in Russ.).
16. Vishnevsky V.M., Tereshchenko B.N., Tumchenok D.A., Shirvanyan A.M. Comparative analysis of options for constructing a wired ground-to-air power transmission system for tethered high-altitude telecommunication platforms. In: *Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. Proceedings of the 21st International Scientific Conference DCCN 2018*. Moscow: RUDN University; 2018. P. 387–401 (in Russ.).
17. Nguen T.L., Kuzin N.A., Yurkov N.K. On the problem of forming the appearance of promising unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2022;1(37):55–66 (in Russ.). <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2022-1-7>

Об авторе

Давлюд Игорь Игоревич, к.т.н., докторант, кафедра артиллерийского и зенитного ракетного вооружения надводных кораблей, Балтийское высшее военно-морское училище имени адмирала Ф.Ф. Ушакова (236022, Калининград, Советский пр-т, 82). E-mail: sawefew2@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0003-2926-718X>

About the author

Igor I. Dawlyud, Cand. Sci. (Eng.), Doctoral Student, Department of Artillery and Anti-Aircraft Missile Armament of Surface Ships, Admiral F.F. Ushakov Baltic Higher Naval School (82, Sovetsky pr., Kaliningrad, 236022 Russia). E-mail: sawefew2@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0003-2926-718X>