

АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОМПЕНСАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СНОСА ПРИВЯЗНОЙ МУЛЬТИРОТОРНОЙ ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ

© 2022 И. С. Климов , В. Б. Чемоханов

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Волоколамское шоссе, 4, 125993 Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Распространённость беспилотных систем мультироторного типа и их использования в самых различных областях с каждым годом становится всё выше. Однако, почти все подобные системы имеют существенное ограничение — полетное время и, соответственно, эффективное время работы большинства мультироторных платформ (МРП) составляет 15–20 минут. Очевидное решение с использованием аккумуляторов большей емкости или более энергоэффективных аккумуляторов решают данную для ограниченного круга задач. В связи с этим актуален вопрос использования привязных МРП для достижения более высоких значений полетного времени благодаря обеспечению питания по тросу-кабелю для использования в качестве быстро-разворачиваемых наблюдательных пунктов или антенных установок. Специфическим требованиям к данным системам является возможность работать в условиях, когда возможно возмущающее влияние ветра и его порывов на систему стабилизации аппарата. Данные возмущающие воздействия необходимо учитывать при разработке систем управления привязных МРП. В работе дан анализ способов компенсации горизонтального сноса привязной мультироторной летающей платформы, при наличии горизонтально направленного ветрового возмущения. Для минимизации указанного возмущения на движение платформы могут быть использованы различные подходы, что требует разработки соответствующих алгоритмов управления. В рамках решения задачи поиска наиболее эффективного способа управления установлены два наиболее удобных в конструктивном отношении способа компенсации горизонтального сноса: за счет увеличения силы тяги моторов и за счет осуществления разворота МРП. Представлены результаты сопоставительного анализа энергетических затрат на реализацию обоих способов.


Ключевые слова: мультироторная система, привязные системы, беспилотные системы, наблюдение за площадными объектами, БПЛА, гибридные системы, альтернативные источники энергии.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время широкую распространённость получили различные мультироторные платформы, в частности — квадрокоптеры, во многих областях: наблюдение за сельскохозяйственными угодьями, разведка, поиск возгораний в лесных массивах и транспортировка небольших грузов. Существенным недостатком мультироторных систем с химическими источниками тока на борту

является малое полетное время, как правило, оно ограничено 15–30 минутами. Это связано с недостаточной энергоемкостью в используемых в данных аппаратах литий-полимерных аккумуляторов и их аналогов [1].

Очевидным способом увеличения полетного времени является использование на борту источника энергии большей емкости. Но данный метод ограничен располагаемой подъемной силой воздушных винтов аппарата и так называемому «газу висения» – необходимым количеством тяги для обеспечения нахождения аппарата в воздухе. Кроме этого следствием повышения емкости бортового источника

 Климов Илья Сергеевич
e-mail: Klimuch_98@mail.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

энергии является снижение полезной нагрузки и располагаемого диапазона варьирования тяги несущих винтов мультироторной платформы для обеспечения угловой стабилизации и компенсации внешних возмущений. Следует отметить, что существует определенное значение массы аккумулятора относительно массы аппарата, при превышении которого происходит снижение полетного времени МРП [2].

$$m_a \approx m_0 \cdot (e - 1), \quad (1)$$

где m_a — масса аккумулятора, m_0 — масса аппарата без аккумулятора.

Формула подтверждена экспериментальными исследованиями для мультироторной системы (рис. 1).

В этой связи представляется актуальным рассмотреть возможность использования кабеля-троса, по которому электроэнергия подаётся на летательный аппарат с наземной станции [3–5]. Такой аппарат подходит для использования в областях, где нет необходимости осуществлять полеты на большом расстоянии, но остро стоит вопрос о длительном нахождении аппарата в воздухе. Например, системы наблюдения за площадными объектами. Далее в работе под «тросом» подразумевается гибкая механическая связь, соединяющая аппарат с точкой крепления на земле, в том числе кабель электропитания.

1. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПРИВЯЗНЫХ МРП

При анализе способов компенсации горизонтального сноса привязной мультироторной системы необходимо рассмотреть особенности динамики привязных МРП. Очевидно, что в зависимости от вида троса будут меняться подходы, используемые при описании системы привязного ЛА. Кроме этого следует учитывать следующие факторы:

- Воздействие фонового ветра на поведение тросовой системы.
- Влияние случайных ветровых возмущений.
- Явление провисания троса под действием собственного веса.
- Опрокидывающий момент, действующий на аппарат со стороны троса при креплении троса на некотором расстоянии от центра масс аппарата.
- Возникновение релаксационных колебаний при проскальзывании троса через какие-либо промежуточные элементы конструкций.
- Изменение динамики мультироторного аппарата, взятого за основу, при креплении к нему тросовой системы.
- Влияние температуры окружающей среды на механические свойства троса, в том числе — изменение его эластичности.

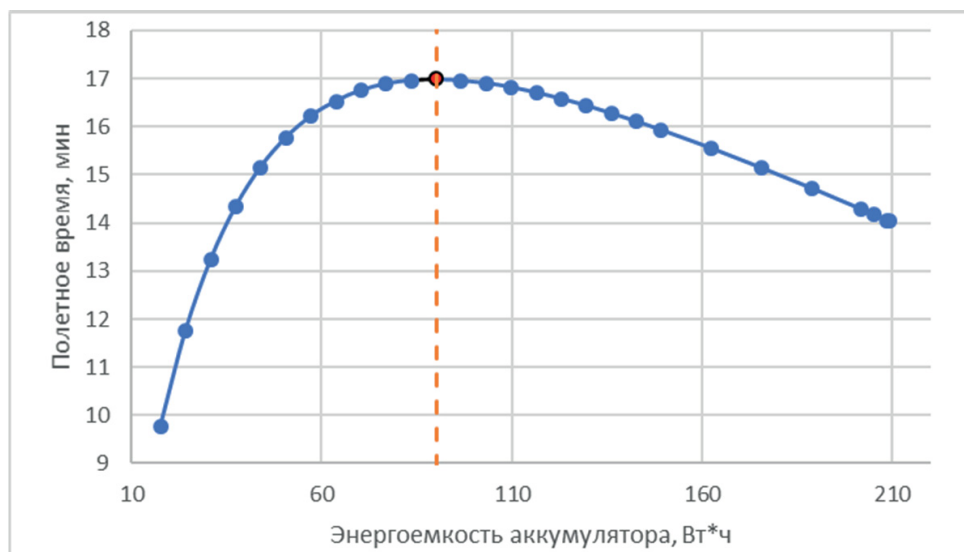


Рис. 1. Обобщение экспериментальных данных зависимости полетного времени от массы бортовой аккумуляторной батареи
 [Fig. 1. Generalization of experimental data on the dependence of flight time on the mass of the onboard battery]

На основе предварительного анализа можно условно ввести следующую геометрическую классификацию привязных МРП (рис. 2):

- Системы с слабым влиянием троса.
- Системы с средним влиянием троса.
- Системы с сильным влиянием троса.

Для систем с слабым влиянием троса влияние внешней среды незначительно, а его вес мал. В этом случае при описании конфигурации троса можно использовать уравнение цепной линии [6]:

$$z = ch \frac{xq}{H}, \quad (2)$$

где q — вес единицы длины троса, H — проекция натяжения нити на горизонтальную ось.

При исследовании систем с средним и сильным влиянием троса из-за наличия ветрового воздействие описания троса с помощью уравнения (2) недостаточно. Известно математическое описание троса, находящегося в установившемся потоке [7]:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dz} = q - \lambda \frac{\Phi_r}{\sin \theta} \\ \frac{d}{dr} = \sin \theta \frac{d}{dz} \\ \frac{dx}{dr} = \cos \theta \cos \psi \\ \frac{d}{dr} \left(T \frac{dx}{ds} \right) + P_x = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где q — вес единицы длины троса, λ — модуль силы давления, θ и ψ — углы, определяющие направления касательной к тросу в рассматриваемой точке, r — длина троса, T — сила натяжения троса, Φ_r — коэффициент угла атаки троса, P_x — силы, действующие на трос по оси x .

Необходимо отметить, что в процессе функционирования привязной МРП может происходить переход классификационной группы в другую в зависимости от изменения окружающих факторов.

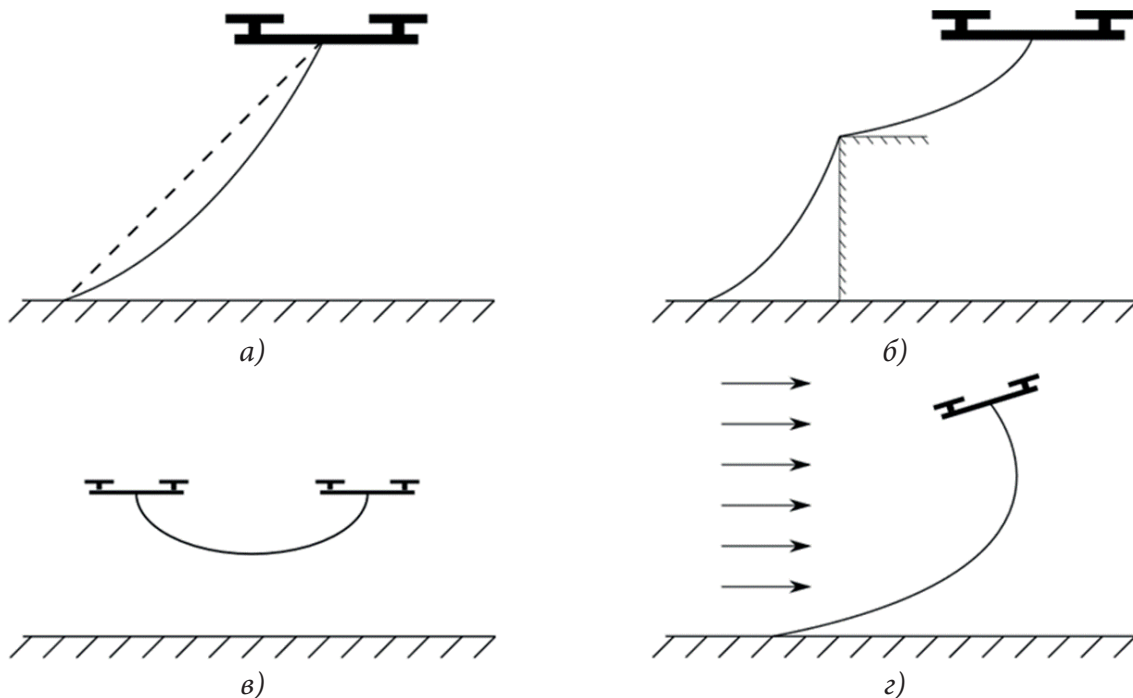


Рис. 2. Варианты расположения троса: а) свободное взаимное расположение мультироторной платформы и троса; б) МРП при перетаскивании троса через кромку объекта; в) связанные два свободнолетающих МРП; г) воздействие сильного ветрового возмущения на привязную МРП

[Fig. 2. Rope arrangement options: a) free mutual arrangement of the multi-rotor platform and the rope; b) MCI when dragging the cable over the edge of the object; c) associated two free-flying MRPs; d) the impact of a strong wind disturbance on the tethered MCI]

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРИВЯЗНЫХ МРП

Для анализа наиболее эффективного способа компенсации ветрового воздействия необходимо учесть силы, действующие на аппарат. На привязную МРП в первом приближении действуют следующие силы: подъемная сила T , сила лобового сопротивления R_x при воздействии ветра со скоростью V , вес аппарата mg и сила натяжения троса T_B в точке крепления троса к аппарату. Данные силы изображены на рис. 3(а).

Как видно из рис. 3(а), сила натяжения T_B является результирующей суммы сил, приложенных к аппарату:

$$T_B = \sqrt{R_x^2 + (T - mg)^2}, \quad (4)$$

Сила лобового сопротивления вычисляется по следующей формуле:

$$R_x = C_x \rho \frac{V^2}{2} S, \quad (5)$$

где C_x — аэродинамический коэффициент лобового сопротивления, ρ — плотность воздуха, S — эффективная площадь аппарата, V — скорость ветра.

При этом, сила T_B будет отклоняться от вертикали на угол θ_B :

$$\operatorname{tg} \theta_B = \frac{T - mg}{R_x}, \quad (6)$$

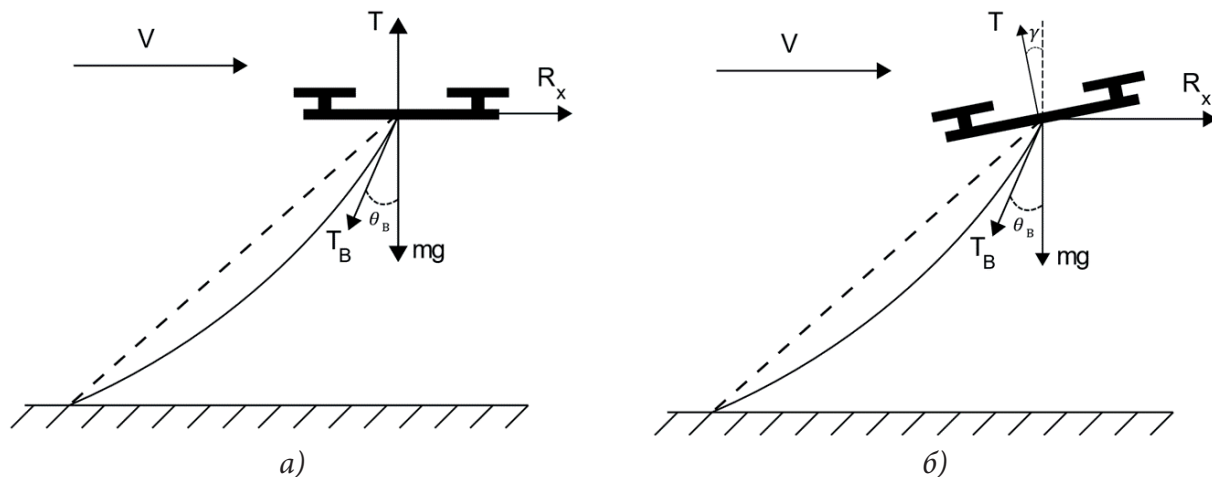


Рис. 3. Силы действующие на привязную МРП: А) без отклонения аппарата, Б) при отклонении аппарата для компенсации горизонтального сноса

[Fig. 3. Forces acting on the tethered MRP: A) without the device deflection, B) with the device deflection to compensate for horizontal drift]

Для оценки необходимой силы для удержания МРП введём коэффициент горизонтального смещения $\frac{h}{l}$. Тогда можно переписать выражение (6) следующим образом:

$$\operatorname{tg} \theta_B = \frac{T - mg}{R_x} \approx \frac{h}{l}, \quad (7)$$

Данный коэффициент показывает, насколько метров сместится аппарат под действием ветрового возмущения при заданной высоте полета. Для оценки необходимой силы тяги, необходимой для поддержания аппарата на заданной высоте, выразим T из (7), с учетом (5):

$$T = R_x \frac{h}{l} + mg = C_x \rho \frac{V^2}{2} S \frac{h}{l} + mg, \quad (8)$$

Для компенсации ветрового смещения могут быть использованы два способа: увеличение тяги при стабилизации горизонтальности аппарата и разворот аппарата на заданный угол. При больших значениях коэффициента горизонтального смещения первый вариант приводит к увеличению потребной силы тяги T , что негативно сказывается на запасе тяги и устойчивости системы. Поэтому, одним из способов является разворот аппарата на угол γ . Таким образом сила тяги T приобретёт горизонтальную составляющую (рис. 3(б)):

Тогда уравнение (8) примет вид:

$$T = \frac{\rho \frac{V^2}{2} S \frac{h}{l} (C_x \cos \gamma + C_z \sin \gamma) + mg}{\cos \gamma + \frac{h}{l} \sin \gamma}, \quad (9)$$

С помощью данного выражения можно определить необходимую силу тяги и угол разворота аппарата для поддержания аппарата в воздухе при скорости ветра V с заданным коэффициентом горизонтального смещения $\frac{h}{l}$. График зависимости потребной тяги от угла разворота аппарата при варьировании скорости ветра приведен ниже (рис. 4):

Как видно из графика, при отсутствии наклона аппарата потребная тяга достигает максимального значения. При увеличении угла наклона аппарата γ величина необходимой силы тяги уменьшается, но при этом вертикальная составляющая силы тяги не может быть меньше веса аппарата (красная пунктирная линия на графике) и не должна превышать располагаемой тяги (зеленая пунктирная линия на графике). Также стоит отметить, что

для обеспечения стабилизации полета и обеспечения устойчивости системы необходимо 10 % тяги от располагаемой, что необходимо учитывать при расчетах реальных значениях максимальной потребной тяги.

Для большей наглядности получим из (9) выражение для мощности двигателей, необходимой для поддержания аппарата в воздухе:

$$N = \sqrt{\frac{T^3}{4\rho \frac{\pi}{4} D^2}}, \quad (10)$$

График функции (10) приведен ниже (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующая проблема повышения полетного времени мультироторных систем не может быть полностью решена с помощью увеличения массы аккумуляторов на борту. Использование привязных мультироторных платформ с обеспечением питания по электрокабелю с земли позволяет радикально

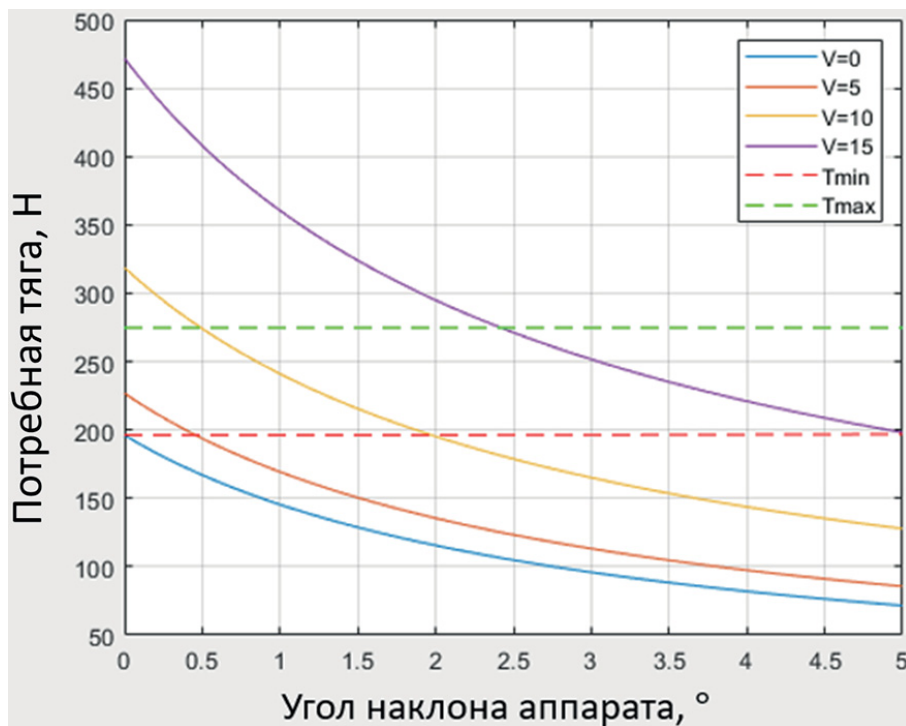


Рис. 4. Расчетные значения потребной тяги аппарата для обеспечения заданной точности горизонтального позиционирования при различных углах наклона аппарата и варьировании скорости ветра (0, 5, 10 и 15 м/с)

[Fig. 4. Estimated values of the required thrust of the apparatus to ensure the given accuracy of horizontal positioning at various angles of inclination of the apparatus and varying wind speed (0, 5, 10 and 15 m/s)]

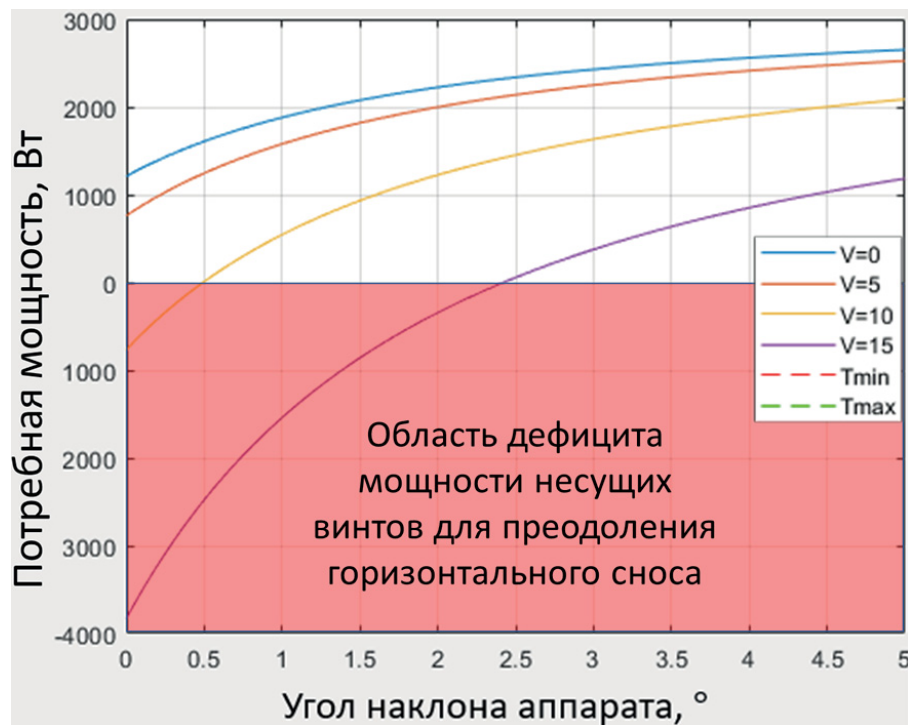


Рис. 5. Соотношение между потребляемой и располагаемой мощностями для обеспечения точности позиционирования в условиях бокового ветра

[Fig. 5. The ratio between the required and available power to ensure positioning accuracy in crosswind conditions]

преодолеть эту проблемы для некоторого круга практических задач.

Появление дополнительной механической связи необходимо учитывать для адаптации существующих алгоритмов управления. Предложенный подход классификации привязных МРП по степени влияния на динамику механической связи позволяет выбрать адекватный способ математического описания. Показано, что для компенсации горизонтального смещения среднесвязанных привязных аппаратов можно использовать два различных варианта — увеличение тяги при стабилизации горизонтальности аппарата и разворот аппарата на заданный угол. Было также установлено, что менее энергозатратным является метод с использованием разворота аппарата — он позволяет сохранить до двух третей мощности аппарата.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрусталева, Д. А. Аккумуляторы / Хрусталева Д. А. – М. : Изумруд, 2003. – 224 с.
2. Chemodanov, V. Concept for composition of hybrid flying multi-rotor platforms with distributed load and its experimental justification / V. Chemodanov, K. Gavrilin, I. Klimov, A. Kotelnikova // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1925, 19th International Conference «Aviation and Cosmonautics» (AviaSpace-2020), 23–27 November 2020, Moscow, Russian Federation.
3. Пат. 2710968 Российская Федерация, МПК В 64 С 27/20. Гибридная мультироторная летающая платформа [Текст] / В. Д. Елисеев, И. С. Климов, А. В. Котельникова, А. А. Мясников, Н. М. Парфенов, В. Б. Чемоданов, В. В. Штракин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». – № 2019106412; заявл. 06.03.2019; опубл. 14.01.2020, Бюл. № 2. – 2 с.

4. Климов, И. С. Особенности создания привязного аэродинамического модуля на основе мультироторной платформы с разделенной нагрузкой / И. С. Климов, К. Б. Гаврилин, Р. О. Шайкин // «Гагаринские чтения – 2019»: Сборник тезисов докладов. – М. : МАИ, 2019. – С. 181–182.

5. Fagiano, L. Systems of Tethered Multicopters: Modeling and Control Design – 2017, IFAC (International Federation of Automatic Control).

6. Светлицкий, В. А. Механика абсолютно гибких стержней / В. А. Светлицкий; под ред. А. Ю. Ишлинского; Федеральная целевая программа «Гос. поддержка интеграции высш. образования и фундамент. Науки». – М. : МАИ, 2001. – 431 с.

7. Меркин, Д. Р. Введение в механику гибкой нити / Д. Р. Меркин. – М. : Наука, 1980. – 240 с.

Климов Илья Сергеевич — аспирант 1-го года обучения кафедры 301 «Системы автоматического и интеллектуального управления» МАИ.

Email: Klimuch_98@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6146-5245>

Чемоданов Владимир Борисович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, начальник научно исследовательского отдела 301 кафедры МАИ.

Email: chemvb@gmail.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0838-4972>

DOI: <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2022/2/17-24>

ISSN 1995-5499

Received 10.03.2022

Accepted 29.06.2022

ANALYSIS OF HORIZONTAL DRIFT COMPENSATION METHODS FOR A TETHERED MULTI-ROTOR FLYING PLATFORM

© 2022 I. S. Klimov✉, V. B. Chemodanov

*Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamskoe Highway, 125993 Moscow, Russian Federation*

Annotation. The prevalence of unmanned systems of the multirotor type and their use in various fields is becoming higher every year. However, almost all such systems have a significant limitation — the flight time and, accordingly, the effective operating time of most multi-rotor platforms (MRPs) is 15–20 minutes. The obvious solution using larger capacity batteries or more energy efficient batteries solves this for a limited range of applications. In this regard, the issue of using tethered MCI to achieve higher flight times due to the provision of power via a cable-cable for use as quick-deployed observation posts or antenna installations is relevant. Specific requirements for these systems is the ability to work in conditions where the disturbing effect of wind and its gusts on the vehicle stabilization system is possible. These disturbances must be taken into account when developing control systems for tethered MCIs. The paper analyzes the ways to compensate for the horizontal drift of a tethered multi-rotor flying platform in the presence of a horizontally directed wind disturbance. To minimize this disturbance to the movement of the platform, various approaches can be used, which requires the development of appropriate control algorithms. As part of solving the problem of finding the most efficient control method, two structurally most convenient ways to compensate for horizontal drift have been established:

by increasing the traction force of the motors and by turning the MCI. The results of a comparative analysis of energy costs for the implementation of both methods are presented.

✉ Klimov Ilya S.
e-mail: Klimuch_98@mail.ru

Keywords: multi-rotor system, tethered systems, unmanned systems, surveillance of areal objects, UAVs, hybrid systems, alternative energy sources.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. *Hrustalev D. A.* (2003) *Akkumuljatory. Moscow : Izumrud.* 224 p. (in Russian)

2. *Chemodanov V., Gavrilin K., Klimov I. and Kotelnikova A.* (2020) Concept for composition of hybrid flying multi-rotor platforms with distributed load and its experimental justification. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1925, 19th International Conference “Aviation and Cosmonautics” (AviaSpace-2020), 23–27 November 2020, Moscow, Russian Federation

3. *Eliseev V. D., Klimov I. S., Kotel'nikova A. V., Mjasnikov A. A., Parfenov N. M., Chemodanov V. B.*

and Shtrakin V. V. (2020) «MAI (NRU)» Hybrid multi-rotor flying platform Pat. RU2710968.

4. *Klimov I. S., Gavrilin K. B. and Shajkin R. O.* (2019) Osobennosti sozdanija privjaznogo ajerodinamicheskogo modulja na os-nove mul'ti-rotornoj platformy s razdelennoj nagruzkoj. «Gagarinskie chtenija – 2019»: *Sbornik tezisov dokladov. Moscow : MAI.* P. 181–182.

5. Fagiano Systems of Tethered Multicopters: Modeling and Control Design – 2017, *IFAC (International Federation of Automatic Control)*

6. *Svetlickij V. A.* (2001) *Mehanika absoljutno gibkih sterzhnej; Pod red. A. Ju. Ishlinskogo; Federal'naja celevaja programma “Gos. podderzhka integra-cii vyssh. obrazovanija i fundament. nauki”. Moscow : MAI.* 431 p. (in Russian)

7. *Merkin D. R.* (1980) *Vvedenie v mehaniku gibkoj niti. Moscow : Nauka.* 240 p. (in Russian)

Klimov Ilya S. — 1st year post-graduate student of department 301 “Automatic and intelligent control systems” MAI.

Email: Klimuch_98@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6146-5245>

Chemodanov Vladimir B. – PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Research Department 301 of the MAI Department.

Email: chemvb@gmail.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0838-4972>