

В. С. Турчановский¹, С. П. Круглов¹, С. В. Ковыршин¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ЗАДАЧИ АДАПТИВНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДВЕШЕННЫХ ГРУЗОВ НА КВАДРОКОПТЕРЕ

Аннотация. В статье рассматривается проблема стабилизации подвешенных грузов на гибкой сцепке при использовании квадрокоптеров в условиях текущей неопределенности и действия внешних возмущений. В последнее время актуальность темы резко возросла в связи с расширением задач, решаемых современными беспилотными летательными аппаратами вертолетного типа, включая транспортировку людей с использованием тяжёлых воздушных платформ (например, «Перун», «Слон»), применение специализированных датчиков и устройств на подвесах для решения таких задач, как разминирование, а также функционирование квадрокоптеров в условиях фронтовых операций. В связи с этим остро стоит вопрос о стабилизации подвешенного груза в условиях разнообразных возмущений. Проведён анализ существующих методов стабилизации, показаны их ограничения и обоснована необходимость перехода к адаптивным системам управления. Рассмотрены особенности динамики системы «квадрокоптер – подвешенный груз» и сформулированы требования к системе управления и аппаратной части системы адаптивной стабилизации подвешенного груза. Предложено использовать идентификационно-аппроксимационный подход для построения адаптивной системы управления квадрокоптером в рассматриваемой задаче, как опробованный подход построения системы гашения маятниковых колебаний подвешенного груза.

Ключевые слова: квадрокоптер, подвешенный груз, адаптивное управление, динамика маятника, устойчивость, транспортировка.

V. S. Turchanovsky¹, S. P. Kruglov¹, S. V. Kovyrshin¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

PROBLEMS OF ADAPTIVE STABILIZATION OF SUSPENDED LOADS ON A QUADCOPTER

Abstract. The article discusses the problem of stabilization of suspended loads on a flexible coupler when using quadcopters in conditions of current uncertainty and the action of external disturbances. Recently, the relevance of the topic has increased sharply in connection with the expansion of tasks solved by modern helicopter-type unmanned aerial vehicles, including the transportation of people using heavy air platforms (for example, Perun, Elephant), the use of specialized sensors and devices on suspensions to solve tasks such as demining, as well as the functioning of quadcopters in front-line operations. In this regard, the issue of stabilizing the suspended cargo in conditions of various disturbances is acute. An analysis of existing stabilization methods was carried out, their limitations were shown and the need to switch to adaptive control systems was justified. The features of the dynamics of the quadcopter-suspended cargo system are considered and the requirements for the control system and hardware of the adaptive suspended cargo stabilization system are formulated. It is proposed to use an identification-approximation approach to build an adaptive quadcopter control system in the task under consideration, as a tested approach to build a system for damping pendulum oscillations of a suspended load.

Keywords: quadcopter, suspended payload, adaptive control, pendulum dynamics, stability, transportation.

Введение. Использование квадрокоптеров в качестве транспортных платформ постоянно расширяется. Сегодня они применяются не только в гражданском секторе, но и в условиях, требующих высокой точности и надёжности. Особую область занимают аппараты, способные переносить грузы значительной массы. Появление тяжёлых квадрокоптеров, таких как «Перун» и «Слон», демонстрирует, что беспилотные системы уже вышли за рамки простых задач доставки: они способны перевозить личный состав, эвакуировать раненых, преодолевать сложные участки местности, выполнять тактические задачи, которые ранее были возможны только для пилотируемых средств [1, 2]. На рис. 1 представлен снимок полета тяжелого квадрокоптера «Перун» во время перевозки человека.

Несмотря на стремительное развитие силовой установки и систем навигации, проблема стабилизации подвешенного груза остаётся не решенной. Даже небольшой груз, подвешенный на тросе длиной 1-3 метра, превращает квадрокоптер в сложную нелинейную динамическую систему, чувствительную к порывам ветра, ускорениям, несимметрии конструкции и изменению центра масс. Любое резкое движение аппарата приводит к колебаниям маятникового типа, которые затем, воздействуя на сам квадрокоптер и могут вызвать потерю устойчивости аппарата [3, 4].

Актуальность темы заключается в том, что практических задач, связанных с подвесными системами, становится больше. Квадрокоптеры применяются для транспортировки оборудования, боеприпасов и медицинских комплектов. Они используются для перевозки раненых, работают с миноискателями, размещёнными на подвесе, служат платформами для размещения датчиков или средств радиоэлектронной борьбы и др. На текущий момент наиболее распространенный способ доставки грузов осуществляется с жестким креплением под квадрокоптером. Подобное крепление грузов сильно влияет на аэродинамику квадрокоптера, а также ограничивает транспортировку в условиях густо расположенных деревьев, кустарников и пр. На рис. 2 представлен снимок квадрокоптера с грузом на жестком подвесе. Помимо этого, для выполнения подобных и более сложных задач используются вертолеты. Например, транспортировка, подъём на высоту сооружений, а также тушение пожаров. Для этого требуется высокая устойчивость и точность контроля груза относительно аппарата [5, 6].



Рис. 1. Транспортировка человека квадрокоптером «Перун»

Динамика квадрокоптера с грузом на подвесе. Система, состоящая из квадрокоптера и груза на тросе, относится к нелинейным. Даже в обычных условиях груз взаимодействует с аппаратом как маятник. На динамику влияют аэродинамические силы, возникающие на грузах различной формы, неравномерные потоки от винтов, смещение центра масс и возможность многократного перераспределения нагрузки во время движения. Колебания груза, возникающие после манёвров или под действием ветра, способны создавать моменты, которые вызывают

ответную реакцию квадрокоптера, приводя к неустойчивости всей системы [7]. На рис. 3 представлен фрагмент из видео с демонстрацией раскачивания подвешенного груза при резком маневре квадрокоптера.

Особенно трудной задача стабилизации становится в условиях, когда характеристики груза заранее неизвестны или могут изменяться. На практике масса, форма, габариты и аэродинамические свойства подвесных объектов редко постоянны. Помимо этого, проблемы возникают при изменении длины подвеса, при выполнении посадки в ограниченных пространствах, где отражённые воздушные потоки создают дополнительные возмущения. Всё это делает невозможным использование только заранее настроенных классических регуляторов.



Рис. 2. Транспортировка груза на жестком подвесе

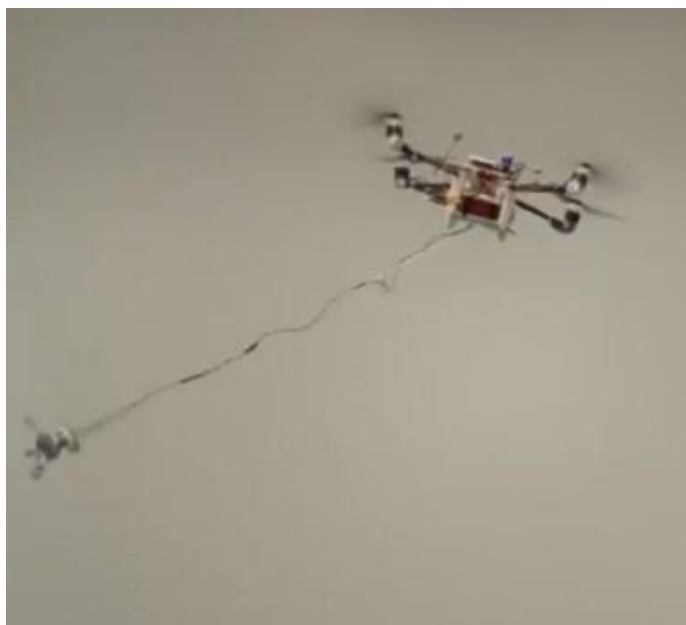


Рис. 3. Раскачивание подвешенного груза при маневре квадрокоптера

Современное состояние вопроса о гашении колебаний подвешенного груза на квадрокоптер. Существующие подходы к стабилизации подвесных грузов можно разделить на несколько категорий. Классические методы используют жёсткую стабилизацию углового положения квадрокоптера, что позволяет компенсировать часть маятниковых колебаний [8].

Однако такой подход плохо работает при активных манёврах и приводит к ограничению скоростей и ускорений аппарата.

Другие методы фокусируются на управлении не ориентацией квадрокоптера, а его скоростью и траекторией, сводя к минимуму резкие изменения управляющих воздействий. Этот подход более эффективен, но часто требует точного знания параметров модели.

Дополнительные решения включают многоточечные подвесы, использование демпфирующих элементов, аэродинамических стабилизаторов или обтекателей, снижающих влияние воздушных потоков. Пассивные системы позволяют уменьшить часть колебаний, но не обеспечивают необходимой адаптивности и не компенсируют нестандартные формы грузов.

Наиболее перспективным направлением считаются методы, использующие обратную связь по реальным колебаниям груза. Для этого применяются камеры, лазерные дальномеры, инерциальные датчики. Такие системы позволяют учитывать не только положение квадрокоптера, но и реальное состояние груза, создавая возможность адаптивной стабилизации в режиме реального времени. Тем не менее даже эти методы не лишены ограничений: программные алгоритмы должны быть устойчивыми к помехам, способными работать при условиях неполной информации и адаптироваться к изменению внешних условий.

Одним из значимых исследований является работа [3]. Она посвящена вопросам эксплуатации летательных аппаратов при транспортировке грузов на внешней подвеске. Целью этого исследования было повышение безопасности и эффективности операций за счёт разработки методов моделирования, экспериментальных методик и технических средств стабилизации груза. В работе была создана обобщённая математическая модель вертолёта с грузом на внешней подвеске, учитывающая динамику троса, аэродинамические возмущения, колебания груза и реактивное воздействие на летательный аппарат.

Одним из ключевых выводов автора работы является то, что летательный аппарат с подвешенным грузом принципиально не может быть стабилизирован лишь за счёт классических регуляторов, так как взаимодействие груза с воздухом и неустойчивость подвесной системы приводят к значительным колебаниям. Автор указывает, что необходимо использовать механические, и алгоритмические решения. Это перекликается с современной проблематикой квадрокоптеров, так как высокая вариативность грузов и неустойчивость воздушных потоков сохраняются и для них, но уже в условиях меньших инерций и более резких переходных режимов.

В более поздней работе, выполненной в [4], исследуются вопросы управления квадрокоптером с несимметричной компоновкой и подвешенным грузом, но уже в условиях, приближенных к современным применениям беспилотников. В отличие от классических вертолётных исследований, здесь основной задачей являлось создание алгоритмов траекторного управления, способных обеспечить равновесный режим движения системы без необходимости точного выдерживания углов ориентации аппарата. Такой подход особенно важен для квадрокоптеров, где высокая маневренность достигается именно быстрыми переходами между угловыми режимами, что в классических методах приводит к сильному раскачиванию груза.

В работе предложен метод ограничений перегрузок, позволяющий системе двигаться в пределах устойчивой области, заданной траектории. Автор показывает, что управление скоростным вектором оказывается эффективнее жёсткой стабилизации углов, так как позволяет уменьшить амплитуду колебаний груза без усложнения контура управления.

В другой работе, посвященной проблеме транспортировки подвесных грузов внесён в диссертационной работе [7], в которой обосновывается влияние параметров груза на управляемость вертолёта. Несмотря на то, что объект исследования отличается от квадрокоптера, полученные результаты имеют схожее значение. Автор показывает, что характеристики управляемости аппарата с грузом изменяются нелинейно, а степень влияния зависит от массы груза, его аэродинамики, длины троса и баллистического коэффициента. Важным фактором является то, что статические показатели (например, максимальное угловое ускорение)

оказываются недостаточными для объективной оценки устойчивости, для этого требуются именно динамические параметры.

Эта мысль напрямую относится к задаче адаптивной стабилизации грузов на квадрокоптере, поскольку динамические характеристики (угол отклонения груза, скорость его раскачивания и реактивные моменты) являются ключевыми для формирования корректирующих воздействий в реальном времени. Помимо этого, есть необходимость разработки методов, способных работать без проведения дорогостоящих лётных испытаний для летательного аппарата с грузом. Именно к решению этой проблемы стремятся современные адаптивные системы, минимизирующие зависимость алгоритмов от предварительной калибровки и точных параметров груза.

В работе [9] представлено наиболее полное обобщение методов стабилизации подвешенных грузов на квадрокоптерах, включающее классификацию алгоритмов, аппаратных решений и методов измерения колебаний груза. Авторы показывают, что существующие методы можно разделить на две большие группы.

1. Траекторные методы, минимизирующие раскачивание за счет формирования специальной траектории без использования данных о положении груза.

2. Методы с обратной связью по грузу, где контроллер использует текущие углы отклонения и скорости маятниковых колебаний.

Основной частью работы является анализ методов измерения колебаний груза. Показано, что контактные датчики (энкодеры, потенциометры) ненадёжны в реальных условиях, а бесконтактные (камеры, лазерные дальнометры) чувствительны к погоде и освещению. Авторы приходят к выводу, что перспективным направлением являются лёгкие инерциальные модули (AHRS) и методы оценки состояния, интегрированные в адаптивные алгоритмы управления.

Ключевой вывод заключается в том, что до настоящего времени не существует универсальной системы стабилизации, применимой к широкому классу грузов.

Предполагаемые методы реализации адаптивной системы гашения подвешенного груза. Разработка адаптивной системы стабилизации требует комплексного подхода. Перед созданием адаптивной системы необходимо построить математическую модель, которая будет в точности отражать динамику полета квадрокоптера с подвешенным грузом и влияние этого груза на устойчивость моделируемого беспилотного летательного аппарата вертолетного типа. Также необходимо учитывать характеристики груза, модель должна отражать реальные воздействия подвешенного груза на беспилотник, при этом система должна автоматически перестраивать поведение квадрокоптера в зависимости от изменяющихся характеристик груза. Таким образом, можно выделить несколько предполагаемых методов для решения этой задачи:

1. Разработать режим полёта, при котором квадрокоптер с подвешенным грузом на гибком подвесе движется плавно, без колебаний. Данный подход предполагает управление скоростью аппарата вместо жёсткого контроля ориентации и контроль оборотов сервомоторных пар.

2. Использовать алгоритмы, которые создают зону устойчивости вокруг заданной траектории, позволяя системе двигаться к цели, не выходя за допустимые пределы.

3. Применить методы, которые позволяют компенсировать неточности модели и внешние воздействия, в частности, использовать обратную связь по колебаниям груза [10].

4. Использовать многоточечную подвеску, пассивные стабилизаторы и обтекатели для повышения устойчивости системы.

6. Применить бесконтактные методы (например, лазерные системы или видеокамеры) для отслеживания положения груза.

Перспективным направлением в реализации управления квадрокоптером с подвешенным грузом в условиях текущей неопределенности является идентификационно-аппроксимационный метод построения адаптивного управления, обладающий достаточно простыми условиями достижения адаптивных свойств замкнутой системы управления [11]. Тем более, что он был

применен в аналогичной задаче гашения колебаний подвешенного груза на мостовом кране и показал эффективность [12].

Заключение. Стабилизация подвешенного груза на квадрокоптере является задачей, требующей комплексного подхода, включающего моделирование, разработку адаптивных алгоритмов, совершенствование аппаратных решений и проведение реальных испытаний. Современные квадрокоптеры большой грузоподъемности, такие как «Перун» и «Слон», показывают, что сфера применения беспилотников довольно обширная, устойчивость и надёжность подвесных грузов становится критическим фактором для транспортировки людей, эвакуации раненых, выполнения боевых задач и эксплуатации специализированных подвесных модулей.

По анализу выводов сторонних авторов определено, что для управления стабилизацией квадрокоптера с подвешенным грузом недостаточно классических регуляторов. Перспективным направлением для этого является построение адаптивного управления, способного управлять существенно нелинейным объектом, в текущем времени подстраиваться под условия полета и внешние возмущения. Использование адаптивных систем управления должно существенно снизить амплитуду колебаний, повысить устойчивость движения и обеспечить безопасность полётов. В перспективе применение подобного подхода позволит создать универсальную систему, способную эффективно выполнять широкий спектр задач в сложных условиях. Одним из методов построения адаптивной системы управления в рассматриваемой задаче является идентификационно-аппроксимационный подход, обладающий простыми условиями достижения адаптивных свойств системы управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перун. Многофункциональный беспилотный летательный комплекс [Электронный ресурс] – URL: <https://perunmbpla.ru/> (дата доступа 01.12.2025).
2. На передовой скоро появится дрон-тяжеловес "Слон" [Электронный ресурс] – URL: <https://rg.ru/2025/10/08/na-peredovoj-skoro-poiavitsia-dron-tiazheloves-slon.html?ysclid=mj7a444cr452015889> (дата доступа 01.12.2025).
3. Козловский В.Б. Теоретические и методологические основы эксплуатации летательных аппаратов при выполнении строительно-монтажных работ и транспортировке грузов на внешней подвеске: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2004. 32 с.
4. Миронова И.В. Алгоритмы траекторного управления квадрокоптером с несимметричными компоновками и подвешенным грузом для обеспечения равновесного режима полета: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2022. 16 с.
5. Козловский В.Б. Вертолет с грузом на внешней подвеске / В.Б. Козловский, С.А. Паршенцев, В.В. Ефимов; под ред. В.Б. Козловского. М.: Машиностроение: Машиностроение-Полет, 2008. 302 с.
6. Павлов С.С. Колебания груза при его транспортировке на внешней подвеске вертолета: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. С. С. Павлов; под ред. В.И. Арбузова; М-во трансп. РФ, Федеральное агентство воздушного трансп., ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский гос. ун-т гражданской авиации». Санкт-Петербург: Ун-т гражданской авиации, 2008. 167 с.
7. Бабенко Г.Н. Метод оценки влияния груза на внешней подвеске вертолета на его управляемость в процессе летной эксплуатации: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.22.14. Моск. гос. техн. ун-т гражд. авиации. М., 2019. 18 с.
8. Голуб А.П., Зудов В.Б., Локшин Б.Я., Селюцкий Ю.Д. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов // Мехатроника, автоматика, управление. 2024. т.25, №9. С. 490-500.

9. Omar H.M., Akram R., Mukras S.M.S., Mahvouz A.A. Recent Advances and Challenges in Controlling Quadrotors with Suspended Loads // Alexandria Engineering J. 2022. v. 63. P. 253-270.
10. Nihal Dalwadia, Dipankar Deba, S.M. Muyeen Observer based rotor failure compensation for biplane quadrotor with slung load. Ain Shams Engineering Journal. 2022, 101748.
11. Круглов С.П. Идентификационно-аппроксимационный подход к адаптивному управлению выходом многомерного объекта // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2025. Т.26, №9. С.447-456.
12. Круглов С.П., Ковыршин С.В., Коденёв К.Ф. Исследования системы идентификационного управления мостовым краном на его макете // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т.25, №12. С. 646-655.

REFERENCES

1. Perun. Multifunctional unmanned aerial system [Electronic source] – URL: <https://perunmbpla.ru/> (Access: 01/12/2025).
2. A heavyweight drone «Elephant» will be on the front line soon [Electronic source] – URL: <https://rg.ru/2025/10/08/na-peredovoj-skoro-poiavitsia-dron-tiazheloves-slon.html?ysclid=mj7a444cr452015889> (Access: 01/12/2025).
3. Kozlovsky V.B. Theoretical and Methodological Foundations of Aircraft Operation during Construction and Installation Work and Transporting Cargo on an External Sling: Abstract of a Doctor of Engineering Sciences (D.Sc.) Dissertation. Moscow, 2004. 32 p.
4. Mironova I.V. Trajectory Control Algorithms for a Quadcopter with Asymmetric Layouts and a Suspended Cargo to Ensure an Equilibrium Flight Mode: Abstract of a Cand. Sciences (D.Sc.) Dissertation. Moscow, 2022. 16 p.
5. Kozlovsky V.B. Helicopter with Cargo on an External Sling / V.B. Kozlovsky, S.A. Parshentsev, V.V. Efimov; edited by V.B. Kozlovsky. Moscow: Mashinostroenie: Mashinostroenie-Polet, 2008. 302 p.
6. Pavlov S.S. Oscillations of Cargo During Its Transportation on a Helicopter's External Sling: a tutorial for students of higher education institutions. S.S. Pavlov; edited by V.I. Arbuzov; Ministry of Transport of the Russian Federation, Federal Air Transport Agency, FGOU HPE "Saint-Petersburg State University of Civil Aviation". Saint Petersburg: University of Civil Aviation, 2008. 167 p.
7. Babenko G.N. Method for Assessing the Impact of Externally Slung Cargo on a Helicopter's Controllability during Flight Operation: Abstract of Candidate of Technical Sciences Dissertation: 05.22.14. Moscow State Technical University of Civil Aviation. Moscow, 2019. 18 p.
8. Holub A.P., Zudov V.B., Lokshin B.Ya., Selyutskiy Y.D. On Robust Stabilization of Motion of a Quadrotor with Slung Load // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2024, v.25, no.9. P. 490-500.
9. Omar H.M., Akram R., Mukras S.M.S., Mahvouz A.A. Recent Advances and Challenges in Controlling Quadrotors with Suspended Loads // Alexandria Engineering J. 2022. v. 63. P. 253-270.
10. Nihal Dalwadia, Dipankar Deba, S.M. Muyeen Observer based rotor failure compensation for biplane quadrotor with slung load // Ain Shams Engineering Journal. 2022, 101748.
11. Kruglov S. P. Identification-Approximation Approach of Adaptive Control of the MIMO Object Output // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2025, vol. 26, no. 9, P. 447-456.
12. Kruglov S.P., Kovyrshin S.V., Kodenev K.F. Studies of the Identification Control System of an Overhead Crane on its Layout // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2024. v.25, no.12. P.646-655.

Информация об авторах

Вячеслав Сергеевич Турчановский – студент группы ПСм-1-25-1 по направлению подготовки «Приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: orion3663@mail.ru

Сергей Петрович Круглов – профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Сергей Владимирович Ковыршин – доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sergkow@mail.ru

Authors

Vyacheslav Sergeevich Turchanovsky – student of group PSm-1-25-1 in the Instrument Engineering program, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: orion3663@mail.ru

Sergey Petrovich Kruglov – professor of «Automation of Production Processes» Department. Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Sergey Vladimirovich Kovyrshin – associate professor of «Automation of Production Processes» Department. Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sergkow@mail.ru

Для цитирования

Турчановский В.С., Круглов С.П., Ковыршин С.В. Задачи адаптивной стабилизации подвешенных грузов на квадрокоптере // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2025. – № 4. – С. 59-66/ – Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/428-2025>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 01/12/2025)

For citations

Turchanovsky V.S., Kruglov S.P., Kovyrshin S.V. Problems of adaptive stabilization of suspended loads on a quadcopter // “Information technologies and mathematical modeling in the management of complex systems”: electronic. scientific journal. - 2025. - No. 4. - P.59-66. - Access mode: <http://ismm-irgups.ru/toma/428-2025>, free. - Title from the screen. - Language. Russian, English (date of access: 01/12/2025)