

УДК 681.5:629.7.05

**ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ
КВАДРОКОПТЕРАМИ****Мирянова Вера Николаевна,**

доцент кафедры «Искусственный интеллект и автономные системы управления»
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Севастополь, Россия, 1mvm1@mail.ru

Мирянова Анна Дмитриевна,

ассистент кафедры «Информационные технологии и системы»
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Севастополь, Россия, annamrnva@mail.ru

Демьянов Егор Игоревич

магистрант, кафедра «Искусственный интеллект и автономные системы управления»
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Севастополь, Россия, egor.demyanov02@gmail.com

Аннотация

В статье предлагается обзор современных подходов к управлению квадрокоптерами. Их динамика является существенно нелинейной, недоопределенной и нестационарной, что представляет значительную сложность для разработки систем управления и порождает множество вызовов: стабилизация в присутствии внешних возмущений, отслеживание траекторий, изменение конфигурации нагрузки и ограничений аппарата. Важной задачей является выбор наиболее оптимального метода исследования и управления таким летательным аппаратом.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, квадрокоптер, методы управления БПЛА.

**OVERVIEW OF MODERN APPROACHES TO CONTROL OF
QUADROCOPTERS****Vera N. Mirianova**

Ph.D., Associate Professor of the Department «Artificial Intelligence and Autonomous Control Systems»,
Sevastopol State University, Sevastopol, Russia, 1mvm1@mail.ru

Anna D. Mirianova

Assistant of the Department «Information Technologies and Systems»
Sevastopol State University, Sevastopol, Russia, annamrnva@mail.ru

Egor I. Demyanov

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Master's student of the Department «Artificial Intelligence and Autonomous Control Systems»

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia, egor.demyanov02@gmail.com

ABSTRACT

This article provides an overview of modern approaches to quadcopter control. Their dynamics are highly nonlinear, underdetermined, and nonstationary, which poses significant challenges for control system development and generates numerous issues: stabilization in the presence of external disturbances, trajectory tracking, and changing load configurations and vehicle constraints. An important task is to select the most optimal method for studying and controlling such aircraft.

Keywords: unmanned aerial vehicle, quadcopter, UAV control methods.

Введение. В свете быстрого развития мультикоптерных платформ, квадрокоптер (quadrotor UAV) рассматривается как важная исследовательская и прикладная система для задач автономного полёта, манипулирования, мониторинга и логистики. Однако их динамика является существенно нелинейной, недоопределенной и нестационарной, что представляет значительную сложность для разработки систем управления и порождает множество вызовов: стабилизация в присутствии внешних возмущений, отслеживание траекторий, изменение конфигурации нагрузки и ограничений аппарата. В последние пять лет наблюдается значительный сдвиг от классических линейных контроллеров к гибридным системам, включающим предсказательное управление (МРС – Model Predictive Control), адаптивные и обучаемые структуры [1, 3].

Эффективное управление квадрокоптером требует надёжной математической модели. Динамика квадрокоптера обычно разделяется на два контура: контур положения (внешний контур) и контур ориентации (внутренний контур). Такой каскадный подход позволяет упростить задачу синтеза. Внешний контур генерирует желаемые углы крена и тангажа, которые являются задающими воздействиями для внутреннего контура. Это наглядно демонстрирует, что квадрокоптер является недоопределенной системой: для управления шестью степенями свободы (положение и ориентация) используется только четыре управляющих воздействия.

Традиционный подход предполагает построение полной нелинейной модели движения (6 DOF: три поступательных и три угловых координаты) с учётом аэродинамики, гироскопических и крутильных эффектов, последующей линеаризацией в рабочей точке [4]. Однако точность таких моделей ограничена: нестационарностью среды (ветер, турбулентность), изменением массы и распределения массы, динамикой моторов и т.д. В связи с этим всё чаще применяются гибридные методики, сочетающие физическую модель с нейросетевой коррекцией, что позволяет адаптировать модель «на лету» [5].

ПИД-регулятор. Пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы остаются наиболее популярным выбором для коммерческих и любительских платформ благодаря своей простоте и интуитивной понятности настройки. Основным преимуществом ПИД-регуляторов является их независимая работа по каждому каналу управления, что не требует точной математической модели [6]. Однако этот же фактор

становится недостатком при наличии сильных перекрестных связей между каналами и в условиях значительных внешних возмущений.

Линейно-квадратичный регулятор (LQR). Метод LQR, основанный на теории оптимального управления, нашел широкое применение в академических исследованиях. Алгоритм LQR минимизирует квадратичный функционал качества, находя оптимальные коэффициенты обратной связи по состоянию. Для его применения нелинейная модель квадрокоптера линеаризуется вокруг точки равновесия, например, режима висения. Исследования демонстрируют высокую эффективность LQR для задач стабилизации и слежения за траекторией вблизи точки линеаризации. Ключевым недостатком является снижение производительности при больших углах отклонения от точки линеаризации, где нелинейности становятся существенными, а также чувствительность к изменению параметров системы [10 – 13].

Адаптивные и робастные методы. Учитывая неопределённости модели и внешние возмущения, развиваются адаптивные и робастные алгоритмы: back-stepping (метод обратного шага), sliding-mode (скользящее управление), ESO (Extended State Observer - расширенный наблюдатель состояния) и гибридные схемы.

Скользящее управление (SMC – Sliding Mode Control) известно своей робастностью к неопределенностям модели и внешним возмущениям. Принцип SMC заключается в принудительном "притягивании" траектории системы к заданной скользящей поверхности и удержании на ней [14]. Однако классический SMC страдает от явления дрожания – высокочастотных колебаний управляющего сигнала.

В [7] предложен адаптивный RISE-базированный метод слежения траектории квадрокоптера с учётом неопределённостей в приводах и динамике. Метод RISE (Robust Integral of the Sign of the Error) – это робастный метод управления, предназначенный для обеспечения высокой точности слежения и устойчивости в нелинейных системах с неопределённостями и внешними возмущениями. Он относится к адаптивным робастным методам управления и представляет собой модификацию классического интегрального управления с усилением по знаку ошибки. Его цель – устранить влияние неопределённостей и возмущений, сохраняя при этом непрерывность управления (в отличие от скользящего режима, где присутствует дрожание).

Нелинейные и геометрические методы управления. При выполнении агрессивных манёвров, больших углов наклона или необходимости глобальной устойчивости управляют посредством геометрических контроллеров, которые формулируются на многообразиях $SO(3)$ или $SE(3)$. Это математические пространства, которые естественным образом описывают ориентацию и положение тела в пространстве. $SO(3)$ – Special Orthogonal Group (группа вращений) – описывает только ориентацию (вращение) твердого тела в 3D-пространстве, представляется матрицей вращения 3×3 . Строки и столбцы этой матрицы – это ортонормированные векторы. У этого пространства нет сингулярностей. Любая ориентация объекта однозначно описывается некоторой матрицей из $SO(3)$. $SE(3)$ – Special Euclidean Group (группа движений) – описывает полное положение и ориентацию (жесткое движение) тела в пространстве, объединяет матрицу вращения из $SO(3)$ и вектор положения в одну матрицу 4×4 . Геометрический контроллер напрямую оперирует с многообразиями $SO(3)$ и $SE(3)$, а не с углами Эйлера.

В последних исследованиях появляются робастные и адаптивные версии таких контроллеров, способные учитывать ограничения приводов и неопределённости модели [2].

Предсказательное управление (MPC) и его применение. Model Predictive Control (MPC) – это продвинутая стратегия управления, которая предсказывает будущее поведение системы на заданном горизонте и вычисляет оптимальную последовательность

управляющих воздействий, минимизируя целевую функцию. В [3] представлена система управления для автономных квадрокоптеров с возможностью предсказания и переопределения траектории во время полёта. Основное преимущество MPC – возможность учета ограничений на состояния и управления. Основной проблемой при реализации на бортовых контроллерах является вычислительная сложность MPC, особенно для нелинейных моделей (NMPC), хотя последние достижения в области аппаратного обеспечения и алгоритмов постепенно решают эту проблему.

Генерация траекторий и интеграция с контроллерами. Генерация пригодных траекторий остаётся значимой задачей: минимизация jerk/snap позволяет получить плавные траектории. Для квадрокоптера важно, чтобы траектория была не только достижимой, но и динамически гладкой. Резкие изменения ускорения (jerk) или его производной (snap) вызывают: колебания корпуса, перегрузку моторов и пропеллеров, ухудшение точности слежения, рост энергопотребления. Поэтому при генерации траектории в системах управления квадрокоптером часто используется критерий минимизации jerk или snap – т.е. выбирается траектория, которая минимизирует интеграл квадрата jerk/snap при соблюдении граничных условий (начальные и конечные положение, скорость, ускорение и т. д.).

Современные работы 2023–2024 годов реализуют комбинации minimum-snap-генераторов и нелинейных контроллеров (например, NMPC – Nonlinear Model Predictive Control – Нелинейное прогнозирующее управление) [8].

Нейросетевые методы. Методы машинного обучения и обучения с подкреплением (RL Reinforcement Learning) становятся популярными для задач управления квадрокоптером. В частности, искусственные нейронные сети, используются для компенсации нелинейностей и неопределенностей. Глубокое обучение с подкреплением – еще один перспективный подход, позволяющий агенту (квадрокоптеру) обучаться оптимальной стратегии управления через взаимодействие со средой. Эти методы не требуют точной априорной модели, но нуждаются в больших объемах данных для обучения и могут иметь проблемы с гарантиями устойчивости.

В [9] предложен мульти-агентный RL-фреймворк для низкоуровневого управления квадрокоптера. Однако безопасность обучения и перенос из симуляции в реальность остаются вызовами.

Аппаратные платформы и программное обеспечение. Разработка алгоритмов управления тесно связана с доступными аппаратными и программными платформами. Для прототипирования и отладки алгоритмов широко используется среда Matlab/Simulink, позволяющая проводить программно-аппаратное тестирование в реальном времени, прежде чем развертывать код на реальном аппарате [15]. Аналогичный функционал предлагает отечественная платформа математических вычислений и динамического моделирования Engage [16].

Закключение. Обзор показал эволюцию подходов к управлению квадрокоптерами от простых линейных корректирующих устройств до сложных нелинейных и интеллектуальных систем. Выбор оптимального метода зависит от конкретной задачи, требований к производительности, наличия вычислительных ресурсов и уровня неопределенности. Классические ПИД-регуляторы остаются практичным решением для многих приложений, в то время как LQR демонстрирует свою эффективность в условиях, близких к точке линеаризации. Для работы в условиях значительных возмущений и неопределенностей наиболее подходящими являются робастные методы, такие как скользящее управление. MPC открывает возможности для выполнения сложных маневров с учетом ограничений, а методы на основе ИИ обещают создать полностью адаптивные системы, не зависящие от точной модели.

Тенденцией будущего развития является не создание единого универсального алгоритма, а разработка гибридных систем, которые комбинируют предсказуемость и гарантии устойчивости классических методов с адаптивностью и способностью к обучению методов искусственного интеллекта.

Список литературы:

1. Peksa J. A Review on the State of the Art in Copter Drones and Flight Control Systems / J. Peksa, D. Mamchur // *Sensors*. – 2024. – Т. 24, № 11. – С. 3349. – DOI 10.3390/s24113349.
2. Marciano H.N. Systematic Dual Quaternion Based Controller Comparison for a Leader-Follower Quadrotor Formation/ H.N. Marciano, D.K. Dourado Villa, M. Sarcinelli-Filho // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2025. – Т. 111. – С. 48. – DOI 10.1007/s10846-025-02238-z.
3. Kovryzhenko Y., Li N., Taheri E. A Control System Design and Implementation for Autonomous Quadrotors with Real-Time Re-Planning Capability/ Y. Kovryzhenko, N. Li, E. Taheri // *Robotics*. – 2024. – Т. 13, № 9. – С. 136. – DOI 10.3390/robotics13090136.
4. Огольцов И.И. Разработка математической модели пространственного полета квадрокоптера / И.И. Огольцов, Н.Б. Рожнин, В.В. Шеваль // *Труды МАИ*. – 2015. – №83. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-matematicheskoy-modeli-prostranstvennogo-poleta-kvadrokoptera>.
5. Al-Jiboory A. K. Adaptive quadrotor control using online dynamic mode decomposition (DMDc)/ A. K. Al-Jiboory // *European Journal of Control*. – Volume 80, Part B. – 2024, 101117. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2024.101117>.
6. Lopez-Sanchez I. PID control of quadrotor UAVs: A survey/ I. Lopez-Sanchez, J. Moreno-Valenzuela // *Annual Review of Control*. – 2023. – Т. 56. – С. 100900. – DOI 10.1016/j.arcontrol.2023.100900.
7. Johnston K. Adaptive Modified RISE Control for Quadrotors: Enhancing Trajectory Tracking Through Uncertainty Compensation / K. Johnston, A.A. Musabbir, K. B. Kidambi, M. Tiwari // *IEEE Access*. – 2025. – Vol. 13. – P 169166–169177. – DOI 10.1109/ACCESS.2025.3612215.
8. He X. A review of research on the control of quadrotor UAVs based on deep learning PID algorithm / X. He // *Applied Computational Engineering*. – 2024. – Т. 45. – С. 129–133. – DOI 10.54254/2755-2721/45/20241037.
9. Yu B. Multi-Agent Reinforcement Learning for the Low-Level Control of a Quadrotor UAV/ B. Yu, T. Lee // *arXiv preprint arXiv:2311.06144*. – 2023.
10. Аполлонов Д.В. Формирование алгоритмов системы автоматического управления преобразуемого беспилотного летательного аппарата/ Д.В. Аполлонов, К.И. Бибилова, В.М. Шибяев и др.// *Труды МАИ*. – 2022. № 122. – 51 с. – DOI: 10.34759/trd2022-122-23.
11. Shauqee, M. N. Proportional Double Derivative Linear Quadratic Regulator Controller Using Improvised Grey Wolf Optimization Technique to Control Quadcopter / M. N. Shauqee, P. Rajendran, N. M. Suhadis // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2021. – Vol. 11, No. 6. – P. 2699. – DOI 10.3390/app11062699.

12. Sir Elkhatem, A. Robust LQR and LQR-PI control strategies based on adaptive weighting matrix selection for a UAV position and attitude tracking control / A. Sir Elkhatem, S. Naci Engin // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – Vol. 61, No. 8. – P. 6275-6292. – DOI 10.1016/j.aej.2021.11.057.
13. Чжу Х. Система управления квадрокоптером с LQR при возмущении ветра / Х. Чжу, М. С. Селезнева // Наука, технологии и бизнес : Материалы VI Межвузовской конференции аспирантов, соискателей и молодых ученых, Москва, 16–18 апреля 2024 года. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2024. – С. 531-536.
14. Asifa Yesmin. Software-In-The-Loop validation of super twisting based sliding mode control for quadcopters/ Yesmin Asifa, Kumari Kiran, Vivek Borkar Asem, Sinha Arpita, Arya Hemendra // IFAC-PapersOnLine. – 2022. – Vol. 55, Iss. 22. – P. 123-128. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.03.021>.
15. Программно-аппаратный комплекс имитационного моделирования полета мультироторного БЛА / А. М. Исаев, Г. И. Линец, М. А. Исаев, С. В. Мельников // Инфокоммуникационные технологии. – 2020. – Т. 18, № 2. – С. 177-187. – DOI 10.18469/ikt.2020.18.2.08.
16. Документация Engee. – Текст: электронный// Engee.com [сайт]. – URL: <https://engee.com/helpcenter/stable/ru/about/interface-description.html>.

References:

1. Peksa J. A Review on the State of the Art in Copter Drones and Flight Control Systems / J. Peksa, D. Mamchur // Sensors. – 2024. – Т. 24, № 11. – С. 3349. – DOI 10.3390/s24113349.
2. Marciano H. N. Systematic Dual Quaternion Based Controller Comparison for a Leader-Follower Quadrotor Formation/ H. N. Marciano, D. K. Dourado Villa, M. Sarcinelli-Filho // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2025. – Т. 111. – С. 48. – DOI 10.1007/s10846-025-02238-z.
3. Kovryzhenko Y., Li N., Taheri E. A Control System Design and Implementation for Autonomous Quadrotors with Real-Time Re-Planning Capability/ Y. Kovryzhenko, N. Li, E. Taheri // Robotics. – 2024. – Т. 13, № 9. – С. 136. – DOI 10.3390/robotics13090136.
4. Ogoltsov I. I. Development of a Mathematical Model for Spatial Flight of a Quadcopter / I. I. Ogoltsov, N. B. Rozhnin, V. V. Sheval // Proceedings of MAI. – 2015. – No. 83. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-matematicheskoy-modeli-prostranstvennogo-poleta-kvadrokoptera>.
5. Al-Jiboory A. K. Adaptive quadrotor control using online dynamic mode decomposition (DMDc)/ A. K. Al-Jiboory // European Journal of Control. – Volume 80, Part B. – 2024, 101117. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2024.101117>.
6. Lopez-Sanchez I. PID control of quadrotor UAVs: A survey/ I. Lopez-Sanchez, J. Moreno-Valenzuela // Annual Review of Control. – 2023. – Т. 56. – С. 100900. – DOI 10.1016/j.arcontrol.2023.100900.
7. Johnston K. Adaptive Modified RISE Control for Quadrotors: Enhancing Trajectory Tracking Through Uncertainty Compensation / K. Johnston, A.A. Musabbir, K. B. Kidambi,

- M. Tiwari // IEEEAccess. – 2025. – Vol. 13. – P 169166–169177. – DOI 10.1109/ACCESS.2025.3612215.
8. He X. A review of research on the control of quadrotor UAVs based on deep learning PID algorithm / X. He // Applied Computational Engineering. – 2024. – T. 45. – C. 129–133. – DOI 10.54254/2755-2721/45/20241037.
 9. Yu B. Multi-Agent Reinforcement Learning for the Low-Level Control of a Quadrotor UAV/ B. Yu, T. Lee // arXiv preprint arXiv:2311.06144. – 2023.
 10. Apollonov D. V. Formation of Algorithms for an Automatic Control System of a Convertible Unmanned Aerial Vehicle / D. V. Apollonov, K. I. Bibikova, V. M. Shibaev et al. // Proceedings of MAI. – 2022. – No. 122. – DOI: 10.34759/trd2022-122-23.
 11. Shauqee, M. N. Proportional Double Derivative Linear Quadratic Regulator Controller Using Improvised Grey Wolf Optimization Technique to Control Quadcopter / M. N. Shauqee, P. Rajendran, N. M. Suhadis // Applied Sciences (Switzerland). – 2021. – Vol. 11, No. 6. – P. 2699. – DOI 10.3390/app11062699.
 12. Sir Elkhatem, A. Robust LQR and LQR-PI control strategies based on adaptive weighting matrix selection for a UAV position and attitude tracking control / A. Sir Elkhatem, S. Naci Engin // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – Vol. 61, No. 8. – P. 6275–6292. – DOI 10.1016/j.aej.2021.11.057.
 13. Zhu H. Quadcopter Control System with LQR under Wind Disturbance / H. Zhu, M. S. Selezneva // Science, Technology and Business: Proceedings of the VI Interuniversity Conference for Postgraduate Students, Applicants and Young Scientists, Moscow, April 16–18, 2024. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2024. – P. 531–536.
 14. Asifa Yesmin. Software-In-The-Loop validation of super twisting based sliding mode control for quadcopters/ Yesmin Asifa, Kumari Kiran, Vivek Borkar Aseem, Sinha Arpita, Arya Hemendra // IFAC-PapersOnLine. – 2022. – Vol. 55, Iss. 22. – P. 123–128. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.03.021>.
 15. Hardware-Software Complex for Simulation Modeling of Multicopter UAV Flight / A. M. Isaev, G. I. Linets, M. A. Isaev, S. V. Melnikov // Infocommunication Technologies. – 2020. – Vol. 18, No. 2. – P. 177–187. – DOI 10.18469/ikt.2020.18.2.08.
 16. Engee Documentation. – Text: electronic // Engee.com [website]. – URL: <https://engee.com/helpcenter/stable/ru/about/interface-description.html>.