
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 623.746.-519+681.5.09+681.5.015
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-10-829-838

АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА КВАДРОКОПТЕРА

О. В. БАРАНОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: o.baranov@spbu.ru*

ПИД-регулятор является основным элементом системы управления квадрокоптера. Экспериментально проанализировано влияние каждой из трех составляющих стабилизирующего ПИД-регулятора квадрокоптера на его поведение в воздухе. Рассмотрен Autotune — режим автоматической настройки параметров регулятора в составе программного обеспечения (ПО) Mission Planner, популярного полетного контроллера с открытой архитектурой Ardupilot. С помощью математического моделирования и экспериментов из обобщенных данных получен алгоритм настройки стабилизирующего ПИД-регулятора, практическая ценность которого заключается не только в точной настройке ПИД-регулятора, но и возможности его дальнейшей донастройки в процессе эксплуатации. Так, в случае изменения типа, веса или точек крепления полезной нагрузки, а равно и условий полета, целесообразно менять „характер“ стабилизации аппарата. Например, при полете с камерой для сохранения стабильности изображения при высокой кратности увеличения следует сделать работу регулятора более плавной. В случае выполнения полетных заданий в ветреную погоду целесообразно установить другие параметры регулятора, а возможно — и прибегнуть к работе в режиме с контролируемым перерегулированием.

Ключевые слова: квадрокоптер, БПЛА, профилизация, отказоустойчивость, ПИД-регулятор, стабилизация, перерегулирование

Введение. Ключевым элементом системы управления квадрокоптера (как нестабильной системы) является стабилизирующий ПИД-регулятор. Используемый для стабилизации положения аппарата в горизонтальной плоскости ПИД-регулятор непосредственно влияет на управляемость аппарата и характер его поведения в воздухе. Вопросу настройки ПИД-регулятора для квадрокоптера посвящен ряд публикаций. Для практики особую ценность представляют публикации [1—3], а теория ПИД-регулирования в целом глубоко разработана в [4, 5]. Особого внимания заслуживают алгоритмы автоматической настройки параметров регулятора. Такие алгоритмы позволяют снять нетривиальный вопрос первоначальной настройки регулятора. Однако в отношении квадрокоптера они не всегда применимы. Так, например, работа режима Autotune в составе ПО Mission Planner полетного контроллера Ardupilot [6] подразумевает следующие действия со стороны оператора БПЛА:

1) вручную выполнить предварительную базовую настройку регулятора таким образом, чтобы квадрокоптер мог, как минимум, безаварийно оторваться от земли;

- 2) поднять квадрокоптер на высоту не менее 3 м для предотвращения касания аппаратом земли во время настройки;
- 3) активировать режим Autotune;
- 4) во время настройки корректировать положение аппарата в пространстве с пульта управления, контролируя его визуально;
- 5) проверить поведение аппарата с новыми параметрами регулятора, принять их или вернуться к базовым параметрам ПИД;
- 6) перезапустить процедуру автоматического подбора, если это необходимо.

В силу того что алгоритмы автоматической настройки ПИД-регулятора подразумевают изменение его параметров в широком диапазоне, возможно возникновение аварийных ситуаций. Экспериментально установлено, что на квадрокоптере Quantum Nova с облегченной рамой, соответствующем требованиям к отказоустойчивой конфигурации [7], включение режима Autotune неминуемо приводит к падению аппарата на землю.

Таким образом, вопрос настройки ПИД-регулятора на квадрокоптерах различных аппаратных конфигураций нетривиален и требует изучения.

Задача стабилизации квадрокоптера. Уравнение выходного сигнала ПИД-регулятора имеет вид [2]:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}, \quad (1)$$

где K_p , K_i , K_d — коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих регулятора, $e(t)$ — рассогласование между текущим и необходимым значениями регулируемого параметра.

Для вычисления управляющей величины непосредственно в бортовом вычислителе аппарата в режиме реального времени используется рекуррентная формула [2]:

$$u(n) = u(n-1) + K_p (E(n) - E(n-1)) + K_i E(n) + K_d (E(n) - 2E(n-1) + E(n-2)),$$

позволяющая минимизировать количество выполняемых операций и снизить разрядность хранимых величин (n — порядковый номер шага).

Движение квадрокоптера складывается из поступательного движения центра масс и сферического движения тела относительно центра масс. Оно может быть описано следующей системой дифференциальных уравнений [8, 9]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= V_x; \quad \frac{dy}{dt} = V_y; \quad \frac{dz}{dt} = V_z; \\ m \frac{dV_x}{dt} &= (\sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \sin \theta \cos \varphi) U_1; \\ m \frac{dV_y}{dt} &= (-\cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \sin \theta \cos \varphi) U_1; \\ m \frac{dV_z}{dt} &= U_1 \cos \theta \cos \varphi - mg; \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega_\theta; \quad \frac{d\psi}{dt} = \omega_\psi; \quad \frac{d\varphi}{dt} = \omega_\varphi; \\ I_{xx} \frac{d\omega_\varphi}{dt} &= (I_{yy} - I_{zz}) \omega_\theta \omega_\psi - J_{TP} \omega_\theta \Omega + U_2; \\ I_{yy} \frac{d\omega_\theta}{dt} &= (I_{zz} - I_{xx}) \omega_\psi \omega_\varphi + J_{TP} \omega_\varphi \Omega + U_3; \\ I_{zz} \frac{d\omega_\psi}{dt} &= (I_{xx} - I_{yy}) \omega_\psi \omega_\theta + U_4. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь x, y, z — координаты центра масс; V_x, V_y, V_z — проекции вектора линейной скорости; θ — угол тангажа; φ — угол крена; ψ — угол рыскания; ω_θ — угловая скорость тангажа; ω_ψ — угловая скорость рыскания; m — масса аппарата; I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} — моменты инерции вокруг оси x, y и z соответственно; U_1, U_2, U_3, U_4 — каналы управления БПЛА; Ω — общая скорость четырех винтов; J_{TP} — общий вращательный момент инерции вокруг оси винта.

Представим уравнения связи каналов управления U_1, U_2, U_3, U_4 со скоростями вращения винтов:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2); \\ U_2 &= lb(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2); \\ U_3 &= lb(-\Omega_1^2 + \Omega_3^2); \\ U_4 &= d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2); \\ \Omega &= -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4, \end{aligned} \right\}$$

где l — расстояние между центром квадрокоптера и центром пропеллера, b и d — аэродинамические составляющие тяги и коэффициента сопротивления соответственно.

Необходимо стабилизировать квадрокоптер, т.е. выбрать параметры K_p, K_i, K_d для стабилизации заданных значений углов $\varphi_0, \theta_0, \psi_0$ (рис. 1).

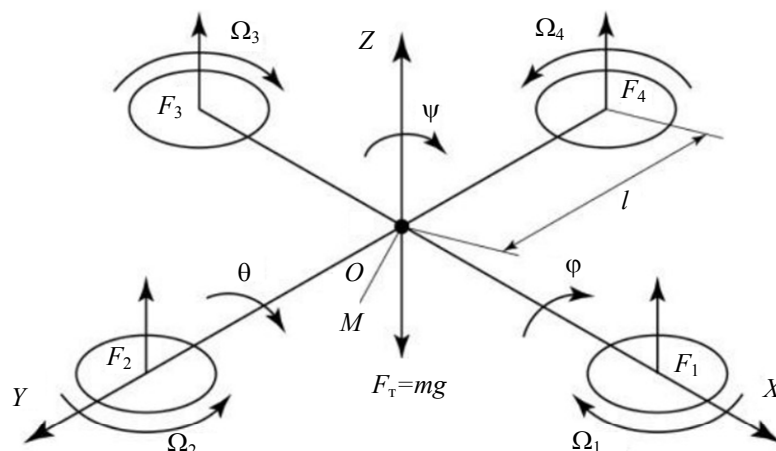


Рис. 1

Задача первоначального подбора сразу трех параметров регулятора для несбалансированного летательного аппарата нетривиальна. Неправильный выбор параметров не позволит ему взлететь. При первом полете собранного аппарата разумно использовать некоторые базовые настройки регулятора, за которые могут быть приняты настройки регулятора аналогичного по геометрии и тяговооруженности аппарата.

Влияние параметров регулятора на поведение квадрокоптера. ПИД-регулятор встроен в систему управления квадрокоптером согласно рис. 2.

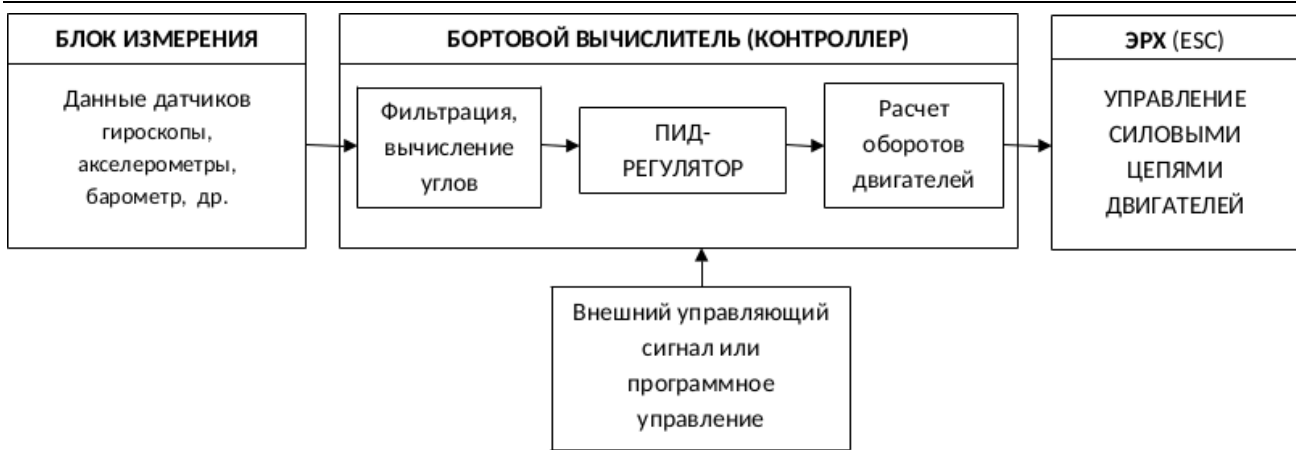


Рис. 2

Учитывая характеристики различных элементов схемы управления, собственные эксперименты, а также обобщая опыт исследователей [8—17], сформулируем ряд рекомендаций по выбору его параметров. В зависимости от планируемого профиля использования аппарата (для соревнований Drone race, для фотокиносъемки) целесообразно производить различную настройку ПИД-регуляторов. Рассмотрим влияние каждого из параметров на поведение аппарата.

Без ограничения общности рассмотрим задачу удержания значения угла $\psi = 0$. Проведем моделирование процесса стабилизации при начальном отклонении $\psi = 3^\circ$ на промежутке 30 мс. Проанализируем влияние параметров регулятора на основе математического моделирования — интегрирования замкнутой системы (2), изменяя только один из параметров регулятора. Данные моделирования подкрепим результатами аналогичного натурального эксперимента на квадрокоптере Quantum Nova.

Пропорциональная составляющая P (результаты моделирования представлены на рис. 3. Значения регулятора [P; I; D]: сплошная кривая — [5; 0,1; 3], пунктир — [15; 0,1; 3], штрихпунктир — [30; 0,1; 3]).

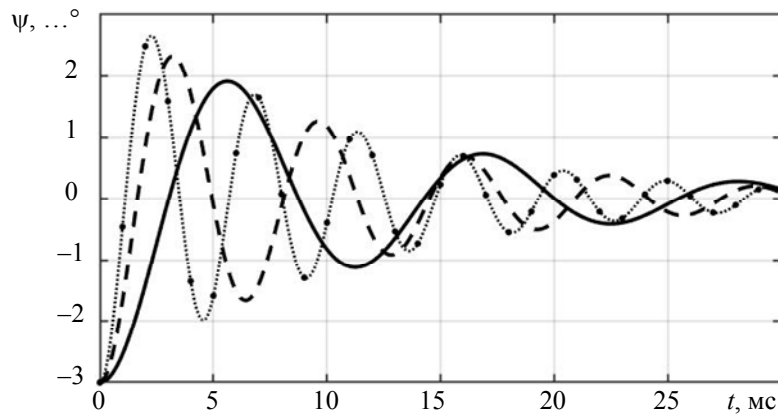


Рис. 3

Таким образом, увеличение значения P приводит к большей устойчивости до тех пор, пока не возникнут осцилляции и потеря управляемости. Уменьшение значения P ухудшает реакцию на управляющее воздействие.

Интегральная составляющая I (результаты моделирования представлены на рис. 4. Значения регулятора [P; I; D]: сплошная кривая — [5; 0,1; 3], пунктир — [5; 0,5; 3], штрихпунктир — [5; 3; 3]).

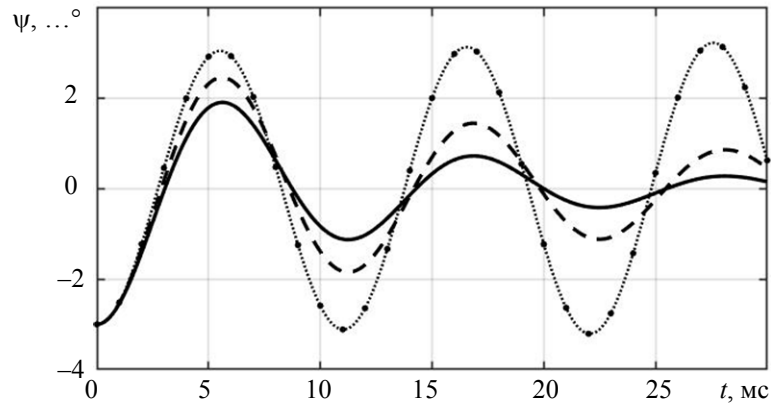


Рис. 4

Установлено, что повышение I способствует улучшению курсовой устойчивости и уменьшает дрейф в горизонтальной плоскости, но также увеличивает задержку возврата в начальное положение. Увеличение I при неизменном P снижает влияние P на управляющее воздействие. Уменьшение значения I снижает скорость реакции аппарата на управляющее воздействие, но при этом увеличивает дрейф аппарата в горизонтальной плоскости и уменьшает способность удерживать стабильное положение.

Дифференциальная составляющая D (результаты моделирования представлены на рис. 5. Значения регулятора $[P; I; D]$: сплошная кривая — $[5; 0,1; 6]$, пунктир — $[5; 0,1; 9]$, штрихпунктир — $[5; 0,1; 12]$).

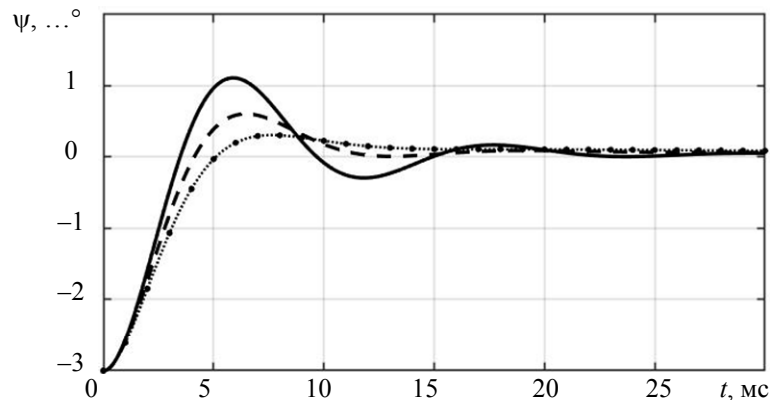


Рис. 5

Увеличение D повышает скорость стабилизации после изменения положения аппарата в пространстве (в результате управления или внешнего воздействия), а также увеличивает влияние пропорциональной составляющей. Это означает также увеличение вероятности появления перерегулирования и осцилляций. Уменьшение D снижает скорость и размер колебаний при возврате в стабилизированное положение.

Таким образом, результаты математического моделирования объясняют наблюдаемые в экспериментах данные. Влияние каждого из параметров регулятора связано с его местом и физическим смыслом в формуле (1). При этом экспериментальные наблюдения придают практическую значимость информации и позволяют оператору БПЛА с помощью ПИД-регулятора настроить поведение аппарата в зависимости от полетного задания, т.е. провести своего рода профилизацию. Обобщив эти результаты, сформулируем алгоритм настройки стабилизирующего ПИД-регулятора квадрокоптера.

Алгоритм настройки, выполняемый оператором БПЛА, отличается от алгоритмов автоматической настройки любых ПИД-регуляторов.

1. Устанавливаются базовые настройки ПИД, при которых аппарат может оторваться от земли. За основу могут быть взяты параметры P , I , D аппаратов, схожих по геометрическим и тяговым характеристикам.

2. Настройка P . Для маневрового аппарата следует использовать максимально возможное (до появления осцилляций) значение P . Уменьшать P (от максимального значения) целесообразно для аппаратов с камерой, а также во время обучения пилотированию.

3. Настройка I производится при визуальном контроле или путем отслеживания „сырых“, нефильТРованных данных (raw data) гироскопов по телеметрии. Цель — получение значения, при котором аппарат удерживает стабильное положение. При этом исключается внешнее механическое или управляющее воздействие — отклонение от положения неподвижного висения в воздухе. Значение I при этом можно как увеличивать, так и уменьшать.

4. Если изначально выбран вариант использования максимально возможного без осцилляций значения P , то по завершении настройки I следует провести коррекцию P поиском нового максимально возможного значения. Как правило, возможно увеличение P (до момента появления осцилляций), если I в процессе настройки также увеличивалось.

5. Оценивается скорость возвращения аппарата в стабилизированное положение после предельного отклонения ручек управления перемещением аппарата в горизонтальной плоскости. Если скорость возврата недостаточна — D незначительно (в сравнении с другими составляющими регулятора) увеличивают. Если скорость возврата достаточна, D оставляют без изменения. При появлении признаков перерегулирования сначала следует снизить P , а уже затем, если не избежать перерегулирования, снижают D . Настройка D окончена, если аппарат без визуально заметных задержек возвращается в стабилизированное положение.

6. Если параметр D менялся, выполняется повторная настройка P и I . Как правило, P может быть снижен при увеличении D без заметных потерь характеристик стабилизации. При этом I настраивается согласно п. 3.

7. Для тонкой настройки регулятора следует повторять действия п. 1—6 до момента, пока на п. 5 изменять D не потребуется. Настройка закончена.

Замечание 1. Изъяны настройки стабилизирующего ПИД-регулятора хорошо ощущаются тактильно, если прижать аппарат рукой к столу при взлете или крепко держать его за шасси на вытянутых руках. Такая диагностика позволяет определить не воспринимаемые глазом осцилляции, а в случае наличия явного перерегулирования — не повредить аппарат. Необходимо соблюдать осторожность, защищать глаза и руки: вращающиеся лопасти аппарата могут причинить травму.

Режим с перерегулированием. Во время экспериментальных исследований на аппарате Quantum Nova замечен следующий эффект. При настройке параметров стабилизирующего ПИД-регулятора непосредственно в процессе полета по представленному выше алгоритму на основе телеметрических данных самым сложным процессом оказывается настройка дифференциальной составляющей регулятора D . Даже незначительное (по диапазону, по сравнению с параметрами P и I) изменение этого параметра приводит к появлению перерегулирования.

Пытаясь стабилизировать положение, аппарат создает стабилизирующее воздействие сильнее необходимого, а последующее воздействие — еще сильнее и т.д. В результате происходит переворот аппарата и потеря управления.

При этом неоднократно отмечался следующий эффект: дозированное перерегулирование, не приводящее к потере управления и слабо отличимое визуально, положительно сказывается на устойчивости аппарата к внешнему воздействию. Стабилизация аппарата происходит значительно быстрее, а при увеличении полезной нагрузки аппарата рост D в целом положительно сказывается на фактической управляемости аппарата. При этом реакция на

управляющее воздействие оператора улучшается, уменьшаются задержка между отклонением ручек управления и реакцией аппарата.

Замечание 2. Такой эффект наблюдался только при условии хорошей балансировки винтов аппарата. Дисбаланс винтов или повреждение лопастей нивелирует положительное влияние этого эффекта. Так, например, установка заведомо поврежденной (на рис. 6 приведены поврежденный в результате контакта с бетонной конструкцией и исправный винты) лопасти на аппарат, настроенный с перерегулированием, приводит к невозможности взлета (в то же время при стандартной настройке ПИД-регулятора аппарат с такой лопастью взлетает и управляется). Очевидной причиной этого является наличие собственных колебаний аппарата с дисбалансом лопастей. Скорость вращения лопастей квадрокоптера может достигать десятков тысяч оборотов в минуту. По мере увеличения скорости вращения лопастей растет и частота колебаний. При прохождении некоторого критического значения частоты колебаний разрешающей способности установленных на борту гироскопов становится недостаточно. ПИД-регулятор начинает стабилизировать колебания, не имея достаточных данных о текущем значении углов. Поскольку и сам регулятор управляет скоростью вращения винтов, меняя частоту колебаний, возникает неизбежное перерегулирование. При этом в штатном режиме настройки ПИД-регулятора (без запланированного дозированного перерегулирования) такие высокочастотные колебания не успеют вызвать управляющее воздействие.



Рис. 6

Отметим, что конкретные значения параметров регулятора с запланированным дозированным перерегулированием подбираются исключительно экспериментально и зависят от множества факторов: конфигурации аппарата, веса и расположения полезной нагрузки, состояния винтов и т.д. Выход на режим осуществляется за счет более высокого значения D .

Заключение. ПИД-регулятор — достаточно простое и эффективное решение для стабилизации квадрокоптера. Несмотря на то что известно множество способов его настройки, тема все еще актуальна [17]. При повседневной эксплуатации аппарата неизменной конфигурации донастройка параметров регулятора, как правило, не требуется. Пользователи БПЛА редко обращаются к настройке его параметров, используя штатные значения. Однако исследование, проведенное в настоящей работе, показывает, что ПИД-регулятор квадрокоптера имеет определенный потенциал для профилизации. Алгоритм настройки регулятора, выполняемый оператором БПЛА, достаточно понятен. Таким образом, даже при наличии большого парка БПЛА в организации изложенные результаты могут расширить возможности и повысить комфорт использования квадрокоптеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advanced Tuning – Copter Documentation [Электронный ресурс]: <<https://ardupilot.org/copter/docs/tuning.html>>. (дата обращения 09.05.2021)
2. Baranov O. V., Smirnov N. V., Smirnova T. E. On the choosing problem of PID controller parameters for a quadcopter // Proc. of the 2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V.F. Demyanov), CNSA 2017. 10 July 2017. DOI: 10.1109/CNSA.2017.7973934.
3. Sheval V., Rozhnin N. Methods of Increasing of Onboard Tracking System with Optical Device Dynamic Accuracy // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115 AISC. P. 540—549. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_52.
4. Жмудь В. А., Заворин А. Н., Ядрышников О. Д. Неаналитические методы расчета ПИД-регуляторов: учеб. пособие. Новосибирск: Новосибирский гос. технический ун-т, 2013. 36 с.
5. Автономный квадрокоптер с нуля: PID и грабли [Электронный ресурс]: <<http://habrahabr.ru/company/technoworks/blog/216437/>>. (дата обращения 09.05.2021)
6. Mission Planner Home [Электронный ресурс]: <<https://ardupilot.org/planner/>>. (дата обращения 09.05.2021)
7. Baranov O. V., Smirnov N. V., Smirnova T. E., Zholobov Y. V. Design of Fail-Safe Quadcopter Configuration // 13th Intern. Symp. on Intelligent Distributed Computing, IDC 2019. Studies in Computational Intelligence. 2020. Vol. 868. P. 13—22. DOI: 10.1007/978-3-030-32258-8_2.
8. Popkov A. S., Smirnov N. V., Baranov O. V. Real-time quadcopter optimal stabilization // Proc. of the 2015 Intern. Conf. on “Stability and Control Processes” in Memory of V.I. Zubov, SCP. 2015. Article number 7342066. P. 123—125. DOI: 10.1109/SCP.2015.7342066.
9. Пыркин А. А., Мальцева Т. А., Лабадин Д. В., Суров М. О., Бобцов А. А. Синтез системы управления квадрокоптером с использованием упрощенной математической модели // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 4. С. 47—51.
10. Дахер Сайфеддин. Мехатронная система управления полетом квадрокоптера и планирование траектории методами оптической одометрии: Дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск: Южно-Российский гос. политех. ун-т. им. М.И. Платова, 2015. 186 с.
11. Ефимов И. Программируем квадрокоптер на Arduino (часть 1) [Электронный ресурс]: <<http://habrahabr.ru/post/227425/>>. (дата обращения 09.05.2021)
12. Hoang V. T., Phung M. D., Dinh T. H., Zhu Q., Ha Q. P. Reconfigurable Multi-UAV Formation Using Angle-Encoded PSO // Proc. of the 15th IEEE Intern. Conf. on Automation Science and Engineering. 2019. P. 1670—1675. DOI: 10.1109/COASE.2019.8843165.
13. Makkay I. Redundancy for UAS — Fail-safe engineering // Proc. of the 16th Intern. Conf. Transport Means. 2012. P. 192—195.
14. Ermakov R. V., Kuz'menko I. K., Skripal E. N. et al. Aspects of Designing a Fail-Safe Flight and Navigation System for Unmanned Aerial Vehicles // Proc. of the 26th Saint Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems, ICINS 2019. Art. number 8769411. DOI: 10.23919/ICINS.2019.8769411.
15. Попов Н. И., Емельянова О. В., Яцун С. Ф., Савин А. И. Исследование колебаний квадрокоптера при внешних периодических воздействиях // Фундаментальные исследования. 2014. № 1. С. 28—32.
16. Baranov O. V., Smirnov N. V., Smirnova T. E., Zholobov Y. V. Design of a quadcopter with PID-controlled fail-safe algorithm // Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications. 2020. Vol. 11, N 2. P. 23—33. DOI: 10.22667/JOWUA.2020.06.30.023.
17. Ремизова О. А., Сыроквашин В. В., Фокин А. Л. Синтез робастных систем управления с типовыми регуляторами // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 12. С. 966—972. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-12-966-972.

Сведения об авторе

Олег Владимирович Баранов — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет, факультет прикладной математики – процессов управления;
E-mail: o.baranov@spbu.ru

Поступила в редакцию
26.05.2021 г.

Ссылка для цитирования: Баранов О. В. Алгоритм настройки стабилизирующего ПИД-регулятора квадрокоптера // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 10. С. 829—838.

ALGORITHM FOR TUNING THE STABILIZING PID CONTROLLER OF QUADCOPTER

O. V. Baranov

St. Petersburg State University, 199034, St. Petersburg, Russia
E-mail: o.baranov@spbu.ru

The PID controller is the main element of a quadcopter control system. The influence of each of the three components of the stabilizing PID controller of a quadcopter on its behavior in the air is analyzed experimentally. Regime of automatic tuning of the regulator parameters is considered using the example of the Autotune mode as part of the Mission Planner software, a popular flight controller with an open Ardupilot architecture. With the help of mathematical modeling and experiments, an algorithm for tuning the stabilizing PID controller was derived from the generalized data. Practical value of the developed algorithm lies not only in the precise tuning of the PID controller, but also in the possibility of its further tune-up during operation. So, in the case of a change in the type, weight or attachment points of the payload, as well as in the flight conditions, it makes sense to change the “character” of the vehicle stabilization. For example, when flying with a camera, to maintain image stability at a high magnification ratio, the regulator operation should be smoother. In the case of flight tasks performing in windy weather, it is advisable to set other parameters of the regulator, and possibly to resort to operating in a mode with controlled overshoot.

Keywords: quadcopter, UAV, profiling, fault tolerance, PID controller, stabilization, overshoot

REFERENCES

1. *Advanced Tuning – Copter Documentation*, ardupilot.org/copter/docs/tuning.html.
2. Baranov O.V., Smirnov N.V., Smirnova T.E. *Proc. of the 2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V.F. Demyanov)*, CNSA 2017, 10 July 2017, Article number 7973934, DOI: 10.1109/CNSA.2017.7973934.
3. Sheval V., Rozhnin N. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1115 AISC, pp. 540–549, DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_52.
4. Zhmud' V.A., Zavorin A.N., Yadryshnikov O.D. *Neanaliticheskiye metody rascheta PID-regulyatorov (Non-Analytical Methods for Calculating PID Controllers)*, Novosibirsk, 2013, 36 p. (in Russ.)
<http://habrahabr.ru/company/technoworks/blog/216437>. (in Russ.)
5. *Mission Planner Home*, <https://ardupilot.org/>.
7. Baranov O.V., Smirnov N.V., Smirnova T.E., Zholobov Y.V. *13th International Symposium on Intelligent Distributed Computing, IDC 2019*, Studies in Computational Intelligence, 2020, vol. 868, pp. 13–22, DOI: 10.1007/978-3-030-32258-8_2
8. Popkov A.S., Smirnov N.V., Baranov O.V. *Proc. of the 2015 International Conference on “Stability and Control Processes” in Memory of V.I. Zubov, SCP 2015*, Article number 7342066, pp. 123–125, DOI: 10.1109/SCP.2015.7342066.
9. Pyrkin A.A., Maltseva T.A., Labadin D.V., Surov M.O., Bobtsov A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2013, no. 4(56), pp. 47–51. (in Russ.)
10. Saifeddin Daher, *Mekhatronnaya sistema upravleniya poletom kvadrokoptera i planirovaniye trayektorii metodami opticheskoy odometrii (Mechatronic Quadcopter Flight Control System and Trajectory Planning Using Optical Odometry)*, Candidate's thesis, Novocherkassk, 2015, 186 p. (in Russ.)
<http://habrahabr.ru/post/227425>. (in Russ.)
12. Hoang V.T., Phung M.D., Dinh T.H., Zhu Q., Ha Q.P. *15th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 2019, pp. 1670–1675, DOI: 10.1109/COASE.2019.8843165
13. Makkay I. *Proc. of the 16th International Conference Transport Means*, 2012, pp. 192–195.
14. Ermakov R.V., Kuz'menko I.K., Skripal E.N. et al. *Proc. of the 26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2019*, Article number 8769411, DOI: 10.23919/ICINS.2019.8769411.
15. Popov N.I., Emelyanova O.V., Yatsun S.F., Savin A.I. *Fundamental research*, 2014, no. 1, pp. 28–32. (in Russ.)
16. Baranov O.V., Smirnov N.V., Smirnova T.E., Zholobov Y.V. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, 2020, no. 2(11), pp. 23–33, DOI: 10.22667/JOWUA.2020.06.30.023.
17. Remizova O.A., Syrokvashin V.V., Fokin A.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 12(58), pp. 966–972, DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-12-966-972 (in Russ.)

Data on author**Oleg V. Baranov**

— Post-Graduate Student; St. Petersburg State University, Faculty of Applied Mathematics and Control Processes; E-mail: o.baranov@spbu.ru

For citation: Baranov O. V. Algorithm for tuning the stabilizing PID controller of quadcopter. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 10. P. 829—838 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-10-829-838