Научная статья
Original article
УДК 623.726
DOI 10.55186/26584964_2022_5_6_29

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

STUDY OF THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES AND THEIR MAIN ELEMENTS

Орехов Сергей Юрьевич, Старший преподаватель, КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана**,** E-mail: serg31057@mail.ru;
Гайгеров Максим Алексеевич, студент, КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана, E-mail: kolljei@gmail.com
Бородулин Александр Владимирович, студент, КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана**,** E-mail: Work.borodulin@yandex.ru

Orekhov Sergey Yurievich, Senior Lecturer, KF MSTU. N. E. Bauman, E-mail: serg31057@mail.ru;
Gaigerov Maxim Alekseevich, student, KF MSTU. N. E. Bauman, E-mail: kolljei@gmail.com
Borodulin Alexander Vladimirovich, student, KF MSTU. N. E. Bauman, E-mail: Work.borodulin@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время БПЛА (Беспилотные летательные аппараты) заполнили большую область сфер нашей жизнедеятельности: военные, гражданские, космические, медицинские, логистические и т.д. В

научной сфере продолжают вести работу над модернизацией существующих и разработкой новых дронов, для более эффективного выполнения поставленных перед дроном задач. Цель данной работы заключается в исследовании применения БПЛА (квадрокоптера), рассмотрении его основных элементов, построения математической модели квадрокоптера

Annotation. Currently, UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) have filled a large area of our life: military, civil, space, medical, logistics, etc. In the scientific field, they continue to work on the modernization of existing and the development of new drones in order to more effectively fulfill the tasks assigned to the drone. The purpose of this work is to study the use of a UAV (quadcopter), consider its main elements, build a mathematical model of a quadrocopter

Ключевые слова: БПЛА, дрон, квадрокоптер

Keywords: UAV, drone, quadcopter

Одна из задач управления БПЛА – это обеспечение стабильности полета. При пилотировании БПЛА присутствуют внешние воздействия. Основные воздействия, мешающие пилотированию это: порывы ветра, резкие перепады давления, турбулентные потоки, радио помехи, магнитные аномалии и т.д.

Для стабилизации полета в программное обеспечение дрона используют различные виды регуляторов. Чем лучше подобраны регуляторы и выше тактовая частота обработки данных, тем выше точность и стабильность управления.

Существует большое количество разновидностей дронов и целей их использования. Дроны различаются по количеству использованных роторов и их расположению. Также, на подбор компонентов сильно влияет, будет дрон скоростным, грузовым или комбинированным. Дроны предназначенные для полетов на высоких скоростях имеют свои отличительные особенности. Такие дроны должны быть маленького размера, чтобы максимально уменьшить сопротивление воздуха. Двигатели должны иметь высокий

показатель KV (количество оборотов на 1 вольт). Аккумулятор подбирается максимально легкий, не в ущерб его высокой токоотдаче. Чем выше токоотдача, тем более мощные двигатели можно использовать. Длительность полета у таких дронов не велика, порядка 3-10 минут. Дроны предназначенные для видеосъемок или доставки грузов, должны иметь большой запас тяги. Для таких дронов используют двигатели с низким показателем KV. Винты подбираются с повышенным углом атаки, для увеличения тяги. Аккумуляторы выбираются высоковольтные со средним показателем токоотдачи, но большой емкостью. Однако чем больше емкость не означает, что дрон будет летать дольше. В определенный момент прибавка в емкости становится сравнительно незначительной, по сравнению с прибавкой массы, и время полета не увеличится, а уменьшится. Необходимо искать золотую середину при подборке компонентов.

Дрон (квадрокоптер) является сложным устройством, состоящим из многочисленных компонентов. В свою очередь компоненты делятся на основные и дополнительные. Основные включают в себя полетные контроллеры, систему питания, регуляторы и двигатели. Дополнительные компоненты определяются в зависимости от специализации дрона. К ним можно отнести стабилизатор камеры, грузовые прихваты, баки и различные кронштейны.

Основные элементы:

Полетный контроллер. Главным элементом, без которого нельзя представить ни один квадрокоптер, является полетный контроллер. В роли полетного контроллера может выступать, как и готовые к установке платы, так и любые аппаратные платформы с микропроцессором. Полетный контроллер должен обладать высокой тактовой частотой. Чем чаще происходит цикл опроса и коррекции полета, тем стабильнее будет полет и меньше величина ошибки. [1]

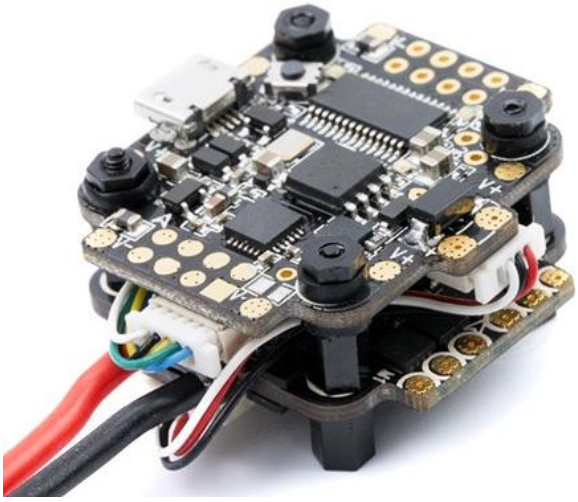

Рисунок 1–Готовый полетный контроллер



Рисунок 2 – Аппаратная платформа

Регулятор двигателя. К полетному контроллеру подключаются двигатели, но подключить непосредственно к контроллеру нельзя. Для этого используются ESC регуляторы. Такие регуляторы применяются для управления бесколлекторными моторами. У регулятора есть несколько основных характеристик. Номинальная и пиковая мощность. Она характеризует какую токоотдачу может обеспечить регулятор на один мотор долговременно и на короткий промежуток времени. Регуляторы поддерживают разные аккумуляторы. В характеристиках это описывается как N*s, где Nявляется количеством параллельно подключенных ячеек батареи. Каждая ячейка выдает 3.7 вольт. И когда на регуляторе указано, что поддерживает 2-4s аккумуляторы, это означает, что данный регулятор работает при напряжении 7,4 – 14,8 вольт. [2]



Рисунок 3 – ESC регулятор

Двигатель. Двигатели для квадрокоптеров существуют двух видов коллекторные и бесколлекторные. Коллекторные двигатели состоят из следующих элементов: вал, коллектор, якорь, щетки, статор. Плюсами данного типа двигателя являются: небольшой вес и габариты, низкая цена, ремонтопригодность. Минусами данного типа двигателей являются: низкий КПД, малая скорость вращения, следовательно, меньше максимальная тяга, перегрев, маленький ресурс, хрупкость.

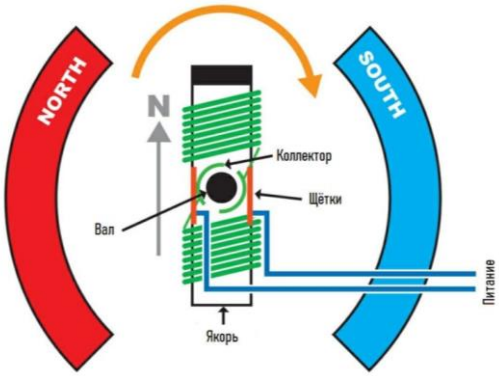

Рисунок 4 – Коллекторный двигатель

Бесколлекторные двигатели состоят из следующих элементов: статор, ротор, катушки с обмоткой. Плюсами данного типа двигателей являются: большая скорость вращения, устойчивость к износу, стойкость к внешним воздействиям, выше КПД по сравнению с коллекторными моторами, хорошее охлаждение, следовательно, ниже температура, тишина работы,

небольшая масса, долговечность. Минусами данного типа двигателей являются: дороговизна, сложность ремонта, более дорогие регуляторы.[3]

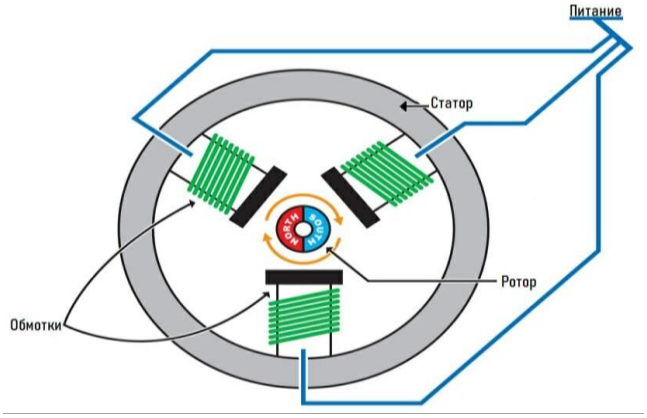

Рисунок 5 - Бесколлекторный двигатель

Аккумулятор. Не менее важным элементом является аккумулятор. Для правильного его подбора необходимо учесть несколько параметров. Аккумулятор подбирается в самом конце, поэтому нам уже известна масса квадрокоптера. Масса батареи должна составлять 25-30% от общей вооруженной массы. В соответствии с регуляторами двигателей определяем показатель N*s, где N – количество параллельно подключенных ячеек. Важно обратить внимание на то, сколько ампер может выдавать аккумулятор единовременно.[4] Если этот показатель окажется слишком низким, максимальная тяга упадет. Если аккумулятор имеет несколько ячеек, важно наличие балансировочной колодки. С помощью балансировочной колодки, разница напряжения в каждой банке будет стремиться к нулю. Емкость аккумулятора характеризует длительность полета дрона, чем она больше в пределах указанной массы, тем дольше будет полет.



Рисунок 6 – Аккумулятор

Описание математической модели квадрокоптера

Для построения математической модели квадрокоптера принимаем, что ротор – это единый элемент, включающий в себя двигатель и жестко закрепленный винт. Корпус и каждый ротор – твердые тела. Точки крепления роторов и центры их масс совпадают. Подвижными частями будем считать только роторы. Роторы равноудалены от центра корпуса на расстояние L, центр корпуса совпадает с его центром масс. [5]

Положение дрона в пространстве определяется радиус-вектором его центра масс r^I и кватернионом ориентации q_{IB}. Скорость центра масс аппарата:

$$v^I = \dot{r}^I.$$

Изменение кватерниона ориентации аппарата определяется уравнением Пуассона:

$$\dot{q}_{IB} = \frac{1}{2} q_{IB} * \Omega^B,$$

где Ω^B – угловая скорость корпуса дрона в проекции на собственные оси.

Перейдем к рассмотрению динамики аппарата. Движение центра масс дрона определяется уравнением:

$$M\ddot{r}^I = F^I,$$

где $M = m + \sum m_i$ (m – масса корпуса,m_i – масса i-го ротора с пропеллером); F^I–главный вектор системы сил, действующих на аппарат.

Главный вектор сил складывается из силы тяжести, подъемных сил пропеллеров и силы аэродинамического лобового сопротивления воздуха. Сила тяжести:

$$F_g^I = Mg^I,$$

где g – ускорение свободного падения.

Сила аэродинамического лобового сопротивления может быть выражена как:

$$F_{aero}^I = -\frac{\rho C S_\perp}{2} |v^I| v^I,$$

где C – аэродинамический коэффициент сопротивления воздуха (ρ);

$S_{\perp}$ - площадь сечения аппарата (зависит от его ориентации).

Подъемная сила пропеллера может быть представлена в виде:

$$F^{I}_{thr_i} = q_{IR} * F^{R_i}_{thr_i} * \widetilde{q_{IR_i}} = \sigma_i k \widetilde{\omega_i} |\widetilde{\omega_i}| \left(q_{IR_i} * e^{R_i}_{z_i} * \widetilde{q_{IR_i}}\right),$$

где k – аэродинамический коэффициент, определяемый экспериментально;

$\widetilde{\omega_i}$ – скорость вращения i-го пропеллера;$e^{R_i}_{z_i}$ – орт оси симметрии i-го ротора, для выбранной конфигурации $\sigma = (1 - 1\ 1 - 1)^T$.

Таким образом,

$$M\ddot{r^I} = Mg^I + \left(F^I_{aero} + \sum_i F^I_{thr_i}\right).$$

Для описания динамики вращательного движения воспользуемся динамическим уравнением Эйлера:

$$J_B \dot{\Omega}^B + \Omega^B * J_B \Omega^B = \tau^B,$$

где J_B – тензор инерции корпуса в главных осях корпуса; τ^B – главный момент сил, действующий на корпус.

Главный момент сил складывается из моментов сил, действующих на корпус аппарата со стороны поворотных роторов с пропеллерами и внешних моментов:

$$\tau^B = -\sum_i \tau^B_i + \sum_i r^B_i * F^B_{thr_i},$$

где τ^B_i – моменты сил, действующие на роторы со стороны аппарата.

Вычислим угловую скорость i-го ротора в проекции на оси R_i:

$$\omega^{R_i}_i = q_{R_iB} * \left(\Omega^B + \dot{\theta}_i e^B_{r_i}\right) * \tilde{q}_{R_iB} + \widetilde{\omega}_i e^{R_i}_{z_i},$$

где r_i – вектор, соединяющий центр масс аппарата с центром масс ротора;

$e^B_{r_i}$ – соответствующий ему орт; θ_i– угол поворота i-го ротора.

Согласно динамическим уравнениям Эйлера, записанным для каждого из роторов:

$$\tau_i^{R_i} + \tau_{aero_i}^{R_i} = J_{R_i}\dot{\omega}_i^{R_i} + \omega_i^{R_i} * J_{R_i}\omega_i^{R_i},$$

где $\tau_i^{R_i}$ – момент сил со стороны корпуса аппарата; J_{R_i} – тензор инерции i-го ротора с пропеллером.

Момент внешних сил может быть вычислен как:

$$J_{aero_i}^{R_i} = -b\widetilde{\omega_i}|\widetilde{\omega_i}|e_{z_i}^{R_i}, \tau_{aero_i}^{B} = q_{BR_i} * \tau_{aero_i}^{R_i} * \tilde{q}_{BR_i},$$

где b – аэродинамический коэффициент, определяемый экспериментально.

Окончательно уравнения вращательной динамики аппарата принимают вид:

$$J_B\dot{\Omega}^B + \Omega^B * J_B\Omega^B = \sum_i \tau_{aero_i}^B - \sum_i q_{BR_i}\left(J_{R_i}\dot{\omega}_i^{R_i} + \omega_i^{R_i} * J_{R_i}\omega_i^{R_i}\right)\tilde{q}_{BR_i} +$$

$$+ \sum_i r_i^B * F_{thr_i}^B.[5]$$

В данной работе был произведен обзор области применения квадрокоптеров, рассмотрены основные составляющие элементы с их особенностями, проведена математическая модель квадрокоптера.

Таким образом, разработка современных БПЛА - квадрокоптеров, особенно для военных целей в современном мире является актуальной, особенно в связи с возрастающими потребностями с целью увеличения импортозамещения.

Литература

1. Режим стабилизации / StabilizemodeArduCopter [Электронныйресурс]: URL: http://ardupilot-mega.ru/wiki/arducopter/stabilize-mode.html
2. Quadrocopter Dynamics, Simulation and Control [Электронныйресурс]: URL: http://docplayer.net/15065562-Quadcopter-dynamics-simulation-and-control-introduction.html
3. Байбородова, Л. В. Методология и методы научного исследования [Электронный ресурс]: учебное пособие для бакалавриата и

магистратуры / Л. В. Байбородова, А. П. Чернявская. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018. — 221 с. — Режим доступа: https://biblio- online.ru/book/847A320D-90A3-452E-A805-3B0B809C9863

4. Тюльпинова Н.В. Алгоритмизация и программирование [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Тюльпинова Н.В.— Электрон. текстовые данные.— Саратов: Вузовское образование, 2019.— 200 с.— Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/80539.html.— ЭБС «IPRbooks»
5. М.Ю. Шавин–Управляемая динамика квадрокоптера с поворотными роторами[Электронный ресурс]: DOI: 10.18698/2308-6033-2018-4-1755

Literature

1. Stabilization mode / StabilizemodeArduCopter [Electronic resource]: URL: http://ardupilot-mega.ru/wiki/arducopter/stabilize-mode.html
2. Quadrocopter Dynamics, Simulation and Control [Electronic resource]: URL: http://docplayer.net/15065562-Quadcopter-dynamics-simulation-and-control-introduction.html
3. Baiborodova, L. V. Methodology and methods of scientific research [Electronic resource]: textbook for undergraduate and graduate studies / L. V. Baiborodova, A. P. Chernyavskaya. — 2nd ed., corrected. and additional - M .: Yurayt Publishing House, 2018. - 221 p. — Access mode: https://biblio-online.ru/book/847A320D-90A3-452E-A805-3B0B809C9863
4. Tyulpinova N.V. Algorithmization and programming [Electronic resource]: textbook / Tyulpinova N.V.— Electron. text data.— Saratov: University education, 2019.— 200 pp.— Access mode: http://www.iprbookshop.ru/80539.html.— EBS “IPRbooks”
5. M.Yu. Shavin – Controlled dynamics of a quadrocopter with rotary rotors [Electronic resource]: DOI: 10.18698/2308-6033-2018-4-1755

© Орехов С. Ю., Гайгеров М. А., Бородулин А. В., 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022

Для цитирования: Орехов С. Ю., Гайгеров М. А., Бородулин А. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022