

УДК 621.313

КОНСТРУКЦИЯ МАНЕВРЕННОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА, В СОСТАВ КОТОРОГО ВХОДИТ БИРОТОРНАЯ ЭЛЕКТРОМАШИНА

А. Б. Захаренко, Д. Ю. Носов

Основным достоинством беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для мониторинга и аэрофотосъемки, является быстрое достижение интересующего участка местности за счет повышения скорости горизонтального полета при изменении углов рыскания и крена. Наибольшее распространение среди беспилотных летательных аппаратов получили конструкции с четным числом винтомоторных групп, в основном квадрокоптеры, поскольку они обладают высокой надежностью. Поворот в плоскости полета осуществляется у них затормаживанием двух винтомоторных групп, что не очень эффективно. В трикоптерах используется механизм поворота (или наклона) задней винтомоторной группы, позволяющий поворачивать ее вектор тяги и, таким образом, управлять режимами полета. Недостатком трикоптеров является отсутствие компенсации реактивного момента воздушного винта каждой из винтомоторных групп за счет наличия парного винта, имеющего противоположное направление вращения. Эта проблема решена применением бироторной электрической машины.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, винтомоторная группа, бироторная электрическая машина.

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) весьма актуально в настоящее время. БПЛА применяются для авиасъемки, они произвели революцию в области аэрофото- и видеосъемки, позволив делать захватывающие кадры, которые используются в кинематографе, при продвижении объектов недвижимости, проведении геодезических исследований и т. д. БПЛА используются для поисковых и спасательных операций. Маневренность и возможность получения видеоизображения в режиме реального времени делают беспилотники ценным инструментом для поисково-спасательных отрядов. БПЛА помогают быстро осмотреть большую территорию, обеспечить обзор с высоты птичьего полета, найти пропавших людей или оценить потенциальную опасность той или иной ситуации. БПЛА, оснащенные камерами высокого разрешения, используются для наблюдения и обеспечения безопасности. Они позволяют контролировать большие территории и обеспечивать охрану периметра, собирая и передавая информацию о нарушителях. Для применения в сельском хозяйстве беспилотники могут быть оснащены специализированными датчиками для мониторинга состояния сельскохозяйственных культур, обнаружения болезней растений, оценки состояния почвы и наблюдения за изменениями окружающей среды. Кроме того, в промышленности беспилотники используются для обследования инфраструктуры, такой как линии электропередач, мосты и трубопроводы.

Наибольшее распространение среди БПЛА получили конструкции с четным числом винтомоторных групп (ВМГ): квадрокоптеры – 4 мотора (рис. 1), гексакоптеры – 6 моторов, октокоптеры – 8 моторов.

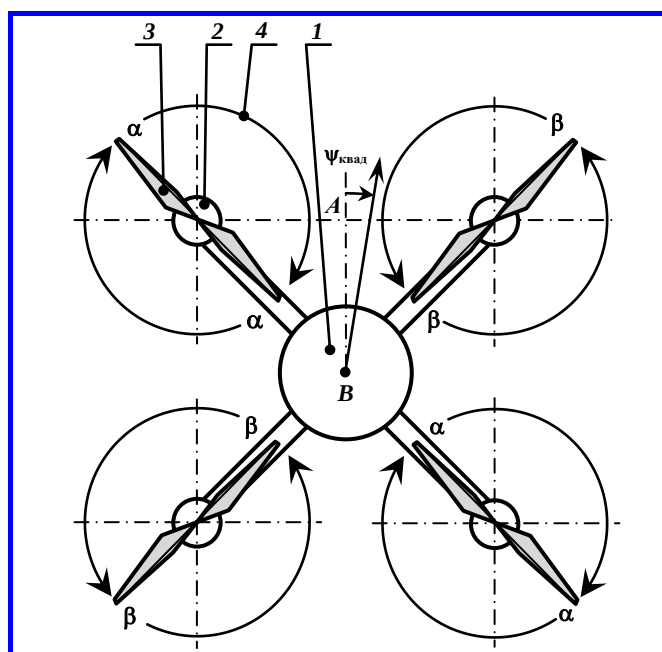


Рис. 1. Схема квадрокоптера: 1 – алюминиевая рама; 2 – электрический двигатель (4 шт.); 3 – воздушный винт (4 шт.); 4 – направление вращения винта

Управление БПЛА с четным числом ВМГ осуществляется следующим образом:

- ускорение всех винтов – подъем;
- ускорение винтов с одной стороны и замедление с другой – движение в сторону;
- ускорение винтов, вращающихся по часовой стрелке, и замедление вращающихся против – поворот в плоскости полета.

Трикоптер – достаточно редкая разновидность мультироторов [1, 2]. Его преимуществами являются: повышенная маневренность по оси курса AB (за счет изменения угла рыскания), которая у копте-

ров с четным числом ВМГ является самой медленной и неточной. Снижение массы за счет использования всего трех моторов, большое расстояние между передними роторами позволяет разместить камеру фото/видеооборудования так, что воздушные винты не будут попадать в поле зрения, не вынося ее далеко от центра масс коптера. Однако, имея всего три воздушных винта, невозможно компенсировать крутящий момент с помощью парного пропеллера, вращающегося в противоположном направлении, как это делается на квадро-, гекса-, окто- и других коптерах. При этом в трикоптерах используется механизм поворота (или наклона) заднего ротора, позволяющий поворачивать его вектор тяги и, таким образом, управлять режимами полета.

Маневренные летательные аппараты необходимы для быстрого достижения интересующего участка местности за счет повышения скорости горизонтального полета при изменении углов крена и рыскания по курсу, что особенно важно при осуществлении мониторинга и аэрофотосъемки в удаленных районах, а также в военных целях (в режиме трансляции видео в реальном времени с камеры FPV-дрона (*First Person View* – «вид от первого лица»)).

Задачей настоящей статьи является создание легкого (обладающего минимальной массой), маневренного беспилотного летательного аппарата, имеющего нечетное количество винтомоторных групп, но при этом достаточно устойчивого во всех режимах полета путем компенсации реактивного момента воздушного винта каждой из винтомоторных групп за счет наличия парного винта, имеющего противоположное направление вращения.

На рис. 2 изображен маневренный летательный аппарат в виде трикоптера, то есть включающий в свой состав три винтомоторные группы. Аппарат состоит из алюминиевой сварной рамы 1, к которой жестко крепятся электрические двигатели 2 с установленными на их выходных валах воздушными винтами 3. Направление вращения винтов 3 показано стрелками 4. Электродвигатели 2 с воздушными винтами 3 относятся к передним винтомоторным группам. Курс (направление движения) аппарата соответствует оси AB . При необходимости изменения угла рыскания $\psi_{\text{трик}}$ сервопривод 5 поворачивает заднюю винтомоторную группу на угол крена γ . В результате этого поворота происходит быстрое изменение угла рыскания $\psi_{\text{трик}}$. Следует отметить, что задняя винтомоторная группа состоит из бироторного электрического двигателя 6 с установленными на его выходных валах парными воздушными винтами 7 и 8, которые вращаются в противоположных направлениях

для компенсации реактивного вращающего момента, который мог действовать на аппарат при наличии только одного винта. Направления вращения парных винтов 7 и 8 показаны стрелками 9 и 10.

Маневренность летательного аппарата характеризуется скоростью поворотов по углам крена, рыскания и тангажа. Наиболее важным для аэрофотосъемки является скорость поворота по углу рыскания. Сравним скорости поворота по углу рыскания для квадрокоптера и трикоптера.

Закон сохранения момента импульса [3] для квадрокоптера (рис. 2) может быть представлен в виде:

$$J_{\text{квал}} \frac{d\psi_{\text{квал}}}{dt} = 2J_{\text{ВМГ}} \left(\frac{d\alpha}{dt} - \frac{d\beta}{dt} \right), \quad (1)$$

где $J_{\text{квал}}$ – момент инерции квадрокоптера; $J_{\text{ВМГ}}$ – момент инерции винтомоторной группы; $\psi_{\text{квал}}$ – угол рыскания квадрокоптера; α – угол вращения винтомоторной группы по часовой стрелке; β – угол вращения винтомоторной группы против часовой стрелки; t – время. Таким образом, скорость поворота квадрокоптера:

$$\Omega_{\text{квал}} = \frac{d\psi_{\text{квал}}}{dt} = \frac{2J_{\text{ВМГ}}}{J_{\text{квал}}} \left(\frac{d\alpha}{dt} - \frac{d\beta}{dt} \right). \quad (2)$$

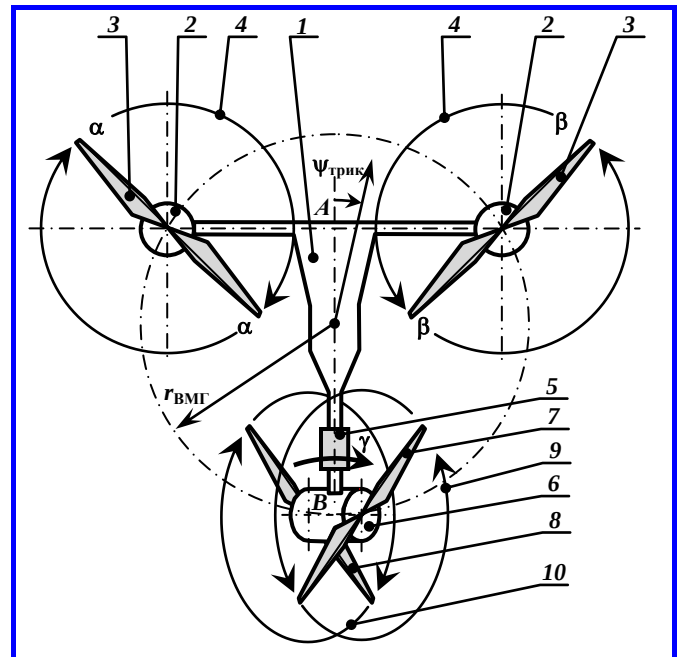


Рис. 2. Схема маневренного летательного аппарата, выполненного по схеме трикоптера

В предельном случае, когда заторможены две из четырех ВМГ для достижения наиболее быстрого поворота квадрокоптера, формула его максимальной скорости поворота по углу рыскания имеет вид:

$$\Omega_{\text{квэд}} = \frac{2J_{\text{ВМГ}}}{J_{\text{квэд}}} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (3)$$

Поворот по углу рыскания трикоптера происходит с ускорением благодаря задней поворотной винтомоторной группе. Динамическое уравнение вращательного движения [3] для трикоптера в предельном случае, когда задняя винтомоторная группа (см. рис. 2, 3), состоящая из бироторного электрического двигателя 6 с установленными на его выходных валах парными воздушными винтами 7 и 8, повернута на 90 градусов относительно плоскости вращения передних ВМГ:

$$J_{\text{трик}} \frac{d^2\psi_{\text{трик}}}{dt^2} = M_{\text{ВМГ-БРЭМ}}, \quad (4)$$

где $J_{\text{трик}}$ – момент инерции трикоптера; $\psi_{\text{трик}}$ – угол рыскания трикоптера; $M_{\text{ВМГ-БРЭМ}}$ – вращательный момент винтомоторной группы бироторной электромашины (БРЭМ).

Подъемная сила винтомоторной группы определяется для трикоптера с учетом коэффициента энерговооруженности k_3 по второму закону Ньютона:

$$F_{\text{ВМГ-БРЭМ}} = \frac{k_3 m_{\text{трик}} g}{3}, \quad (5)$$

где $k_3 = 2$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $m_{\text{трик}}$ – масса трикоптера.

Вращательный момент винтомоторной группы бироторной электромашины определяется по известной формуле:

$$M_{\text{ВМГ-БРЭМ}} = F_{\text{ВМГ-БРЭМ}} r_{\text{ВМГ}}, \quad (6)$$

где $r_{\text{ВМГ}}$ – радиус приложения силы $F_{\text{ВМГ-БРЭМ}}$ показан на рис. 2.

Подставляя формулы (6) и (5) в (4) получим:

$$\frac{d^2\psi_{\text{трик}}}{dt^2} = \frac{2m_{\text{трик}} r_{\text{ВМГ}} g}{3J_{\text{трик}}}. \quad (7)$$

Формула скорости поворота трикоптера по углу рыскания имеет вид:

$$\Omega_{\text{трик}} = \frac{d\psi_{\text{трик}}}{dt} = \frac{2m_{\text{трик}} r_{\text{ВМГ}} g}{3J_{\text{трик}}} \int dt. \quad (8)$$

После выполнения интегрирования получим окончательное выражение:

$$\Omega_{\text{трик}} = \frac{2m_{\text{трик}} r_{\text{ВМГ}} g}{3J_{\text{трик}}} t. \quad (9)$$

Таким образом, получены формулы для максимальных скоростей поворота по углу рыскания квадрокоптера и трикоптера с поворотной винтомоторной группой на основе бироторной электромашины.

Основные технические характеристики квадрокоптера, аналогичного DJI Mavic 3T и построенного на его основе трикоптера:

- взлетная масса 920 г;
- момент инерции квадрокоптера и трикоптера $0,00022 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- момент инерции винтомоторной группы $0,000025 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- частота вращения винтомоторной группы 500 об/мин.

По полученным формулам (3) и (9) были проведены расчеты скоростей поворота квадрокоптера и трикоптера:

- $\Omega_{\text{квэд}} = 118 \text{ рад/с}$ (поворот с постоянной скоростью);
- $\Omega_{\text{трик}} = 517t$ (поворот с ускорением).

По характеристикам трикоптера и квадрокоптера, аналогичных DJI Mavic 3T, можно сделать вывод, что за 0,23 с скорость поворота по углу рыскания трикоптера превысит скорость поворота квадрокоптера, что делает его весьма конкурентоспособным, благодаря применению БРЭМ.

Выводы

1. Предложена конструкция трикоптера, обеспечивающего лучшую маневренность по углу рыскания, чем у аналогичного квадрокоптера, благодаря применению бироторной электрической машины.

2. По характеристикам трикоптера и квадрокоптера, аналогичным DJI Mavic 3T, можно сделать вывод, что за 0,23 с скорость поворота по углу рыскания трикоптера превысит скорость поворота аналогичного квадрокоптера, что делает трикоптер весьма конкурентоспособным.

Литература

1. Патент на полезную модель № 222627 Российская Федерация, МПК В64U 10/13 (2023.01), В64С 15/00 (2006.01), В64С 27/22 (2006.01). Беспилотный летательный аппарат : № 2023126517 : заявл. 17.10.2023 : опубл. 15.01.2024 / С. Ф. Яцун, О. В. Емельянова, В. Я. Мищенко [и др.] ; па-

тентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет». – Бюл. № 2. – 5 с.
2. Патент на полезную модель № 222840 Российская Федерация, МПК В64U 10/10 (2023.01), В64C 27/28 (2006.01). Беспилотный летательный аппарат мульти-роторного типа с изменяющимися углами атаки : № 2023126579 ; заявл. 17.10.2023 ; опубли. 19.01.2024 /

А. А. Филатов, С. Ю. Шуровский, А. С. Голубев ; патен-тообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехниче-ский университет имени С. М. Кирова». – Бюл. № 2. – 7 с.
3. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для вту-зов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Высшая школа, 1989. – 608 с.

Поступила в редакцию 24.04.2025

Андрей Борисович Захаренко, доктор технических наук, доцент, начальник отдела, т. (495) 366-26-44, e-mail: otдел18@mcc.vniiem.ru.

Дмитрий Юрьевич Носов, аспирант, начальник сектора, т. (495) 365-54-38, e-mail: npc14@mcc.vniiem.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

STRUCTURE OF MANOEUVRABLE UNMANNED AERIAL VEHICLE WITH BIROTOR ELECTRIC MACHINE

A. B. Zakharenko, D. Yu. Nosov

PPrimary advantage of unmanned aerial vehicles designed for monitoring and aerial survey is the quick arrival to the specified area by increasing of level speed in case of changing of yaw angle and bank angle. The structures with even numbers of propeller groups, such as quadcopters, are the most common among the unmanned aerial vehicles due to their high reliability. Their rotation in the flight plane is performed by braking of two propeller groups, which is not very effective. Mechanism of rotation (or inclination) of rear propeller group which allows rotating their thrust vector and, in such a way, controlling the flight modes is used in tricopters. Disadvantage of tricopter is the absence of compensation of reactive torque of air propeller of each propeller group due to availability of paired propeller which has opposite rotation direction. The present problem has been solved by using a birotor electric machine.

Key words: unmanned aerial vehicles, propeller group, birotor electric machine.

References

1. Utility model patent No. 222627, Russian Federation, IPC B64U 10/13 (2023.01), B64C 15/00 (2006.01), B64C 27/22 (2006.01). Unmanned aerial vehicle : No. 2023126517 : appl. 17.10.2023 : publ. 15.01.2024 / S. F. Yatsun, O. V. Emelianova, V. Ya. Michenko [et at.] ; patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of the «Southwest State University». – Bul. No. 2. – 5 p.
2. Utility model patent No. 222840, Russian Federation, IPC B64U 10/10 (2023.01), B64C 27/28 (2006.01), B64C 27/22. Unmanned aerial vehicle of multirotor type with changeable angle of attack : No. 2023126579 : appl. 17.10.2023 : publ. 19.01.2024 / A. A. Filatov, S. Yu. Shurovskii, A. S. Golubev ; patent holder Saint-Petersburg State Forest Technical University. – Bul. No. 2 – 7 p.
3. Detlaf, A. A. Course of Physics: study book for technical universities/ A. A. Detlaf, B. M. Yavorskii. – Moscow : Vysshaya Shkola Publishing House (Higher School), 1989. – 608 p.

Andrey Borisovich Zakharenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, т. 8 (495) 366-26-44, e-mail: otдел18@mcc.vniiem.ru.

Dmitriy Yurevich Nosov, Head of Sector, Postgraduate Student, т. 8 (495) 365-54-38, e-mail: npc14@mcc.vniiem.ru. (JSC «VNIEM Corporation»).