

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования
и неразрушающего контроля

Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 681.158.3
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Разработка информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера

В.В. Слепцов¹,
В.Л. Афонин²,
А.Е. Аблаева^{1, @},
Динь Ба Фыонг¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, 101990 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: ablaeva@mirea.ru

Резюме. В статье рассмотрены вопросы синтеза и анализа информационно-измерительных и управляющих систем квадрокоптеров. Приведены основные датчики и модули, применяемые для определения параметров координат квадрокоптеров. Рассмотрены регулируемые по скорости электроприводы, применяемые для управления, и особенности их выбора. Приведены системы координат (неподвижная и подвижная) и кинематическая схема, в соответствии с которыми представлена система дифференциальных уравнений, описывающая динамику движения квадрокоптера и учитывающая предполагаемое плавное движение квадрокоптера с малыми углами крена и тангажа. Разработаны функциональная схема и математическая модель информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера (ИИУС КК) в виде структурной схемы, выполненные с учетом влияния запаздываний поступления информации с датчиков параметров квадрокоптера. Особенностью данной работы является учет конкретных характеристик элементов: регулируемых электроприводов (как постоянного, так и переменного тока), датчиков параметров (барометров, акселерометров, дальномеров и пр.). В работе исследован показательный алгоритм работы информационно-измерительной и управляющей систем квадрокоптера, определены тип и параметры регуляторов систем управления. Особое внимание уделено параметрам настройки для соответствующих контуров управления. Рассмотрено влияние указанных регуляторов информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера на эффекты взаимовлияния координат. Представлены результаты моделирования. Определено оптимальное количество контуров управления координатами информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера и оптимальный вид настроек для получения плавных переходных процессов (без перерегулирования) и исключения взаимовлияния координат на показатели качества.

Ключевые слова: квадрокоптер, регулируемый электропривод, датчики параметров, оптимум по модулю

• Поступила: 17.05.2021 • Доработана: 24.05.2021 • Принята к опубликованию: 25.07.2021

Для цитирования: Слепцов В.В., Афонин В.Л., Аблаева А.Е., Динь Ба Фыонг. Разработка информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):26–36. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Development of an information measuring and control system for a quadcopter

Vladimir V. Sleptsov ¹,
Vyacheslav L. Afonin ²,
Anna E. Ablaeva ^{1, @},
Dinh Ba Phuong ¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 101990 Russia

@ Corresponding author, e-mail: ablaeva@mirea.ru

Abstract. The article deals with the issues of synthesis and analysis of information-measuring and control systems of quadcopters. The main sensors and modules used to determine the parameters of the coordinates of quadcopters are given. The speed-controlled electric drives used for control and the features of their choice are considered. The coordinate systems (fixed and mobile) and the kinematic scheme are given, according to which a system of differential equations is presented. The system describes the dynamics of the quadcopter movement and takes into account the expected smooth movement of the quadcopter with small roll and pitch angles. A functional scheme and a mathematical model of the information-measuring and control system of the quadcopter in the form of a block diagram are developed taking into account the influence of delays in the receipt of information from the sensors of the quadcopter parameters. A special feature of this work is to take into account the specific characteristics of the elements: adjustable electric drives (both direct and alternating current), parameter sensors (barometers, accelerometers, rangefinders, etc.). The paper studies an illustrative algorithm for the operation of the information-measuring and control system of the quadcopter. The type and parameters of the controllers of the quadcopter control systems are determined. Special attention is paid to the settings for the control contours at the corresponding coordinates. The influence of the controllers of the coordinate control systems of the information-measuring and control systems of the quadcopter on the effects of the interaction of coordinates is considered. The simulation results are presented. The optimal number of control loops for the coordinates of the information-measuring and control systems of the quadcopter and the optimal type of settings for obtaining smooth transients (without overshoot) and for excluding the interaction of coordinates on quality indicators are determined.

Keywords: quadcopter, adjustable electric drive, parameter sensors, optimum modulus

• Submitted: 17.05.2021 • Revised: 24.05.2021 • Accepted: 25.07.2021

For citation: Sleptsov V.V., Afonin V.L., Ablaeva A.E., Dinh Ba Phuong. Development of an information measuring and control system for a quadcopter. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):26–36 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ГЛОССАРИЙ

Рыскание – угловое движение летального аппарата вокруг его вертикальной оси.

Тангаж – угловое движение, при котором его продольная ось изменяет свое направление относительно горизонтальной плоскости.

Крен – отклонение плоскости симметрии от вертикального положения.

GLOSSARIUM

Yaw – angular movement of the aircraft around its vertical axis.

Pitch – is an angular motion in which its longitudinal axis changes its direction relative to the horizontal plane.

Roll – the deviation of the plane of symmetry from the vertical position.

ВВЕДЕНИЕ

Современный квадрокоптер (КК) представляет собой беспилотное летающее устройство, имеющее четыре управляемых винта, обеспечивающих перемещение по заданной траектории, и предназначенное для транспортировки, как правило, легких приборов и предметов на ограниченное расстояние для разведки полезных ископаемых и других наблюдений [1, 2]. Общий вид типового квадрокоптера представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид типового квадрокоптера

Применение квадрокоптеров дает определенные преимущества [3–5]:

- рентабельность;
- оперативность;
- способность развивать высокую скорость, планировать, а также зависать над контрольной точкой;
- меньшая стоимость изготовления и эксплуатации (при сравнимой эффективности решения поставленных задач);
- возможность применения без участия летчиков.

При этом не возникает опасности катастрофы.

Недостатками являются нерешенные вопросы интеграции квадрокоптеров в единое воздушное пространство, а также вопросы сертификации, страхования и регистрации, над которыми уже ведутся работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Движение квадрокоптера описывается в неподвижной и подвижной системах координат, представленных на рис. 2.

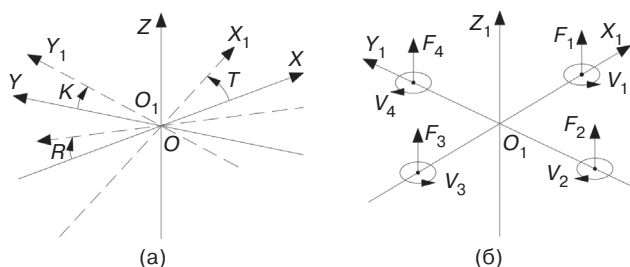


Рис. 2. Неподвижная и подвижная системы координат – (а) и кинематическая схема квадрокоптера – (б)

Приняты следующие обозначения: X, Y, Z – неподвижная система координат; X_1, Y_1, Z_1 – подвижная система координат; F_i – силы тяги винтов; V_i – скорости вращения исполнительных двигателей электроприводов; R – угол рыскания; T – угол тангажа; K – угол крена; g – ускорение свободного падения; ω_i – угловая скорость вращения i -го винта ($i = \overline{1,4}$).

Динамику квадрокоптера можно описать системой дифференциальных уравнений, которая имеет следующий вид [6]:

$$\ddot{X} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{m} \times \times [\cos R \sin T \cos K + \sin R \sin K] - \frac{A_x}{m} \dot{X}, \quad (1)$$

$$\ddot{Y} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{m} \times \times [\sin R \sin T \cos K + \cos R \sin K] - \frac{A_y}{m} \dot{Y}, \quad (2)$$

$$\ddot{Z} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{m} \cos T \cos K - \frac{A_z}{m} \dot{Z} - g, \quad (3)$$

$$\ddot{T} = \frac{l}{J_{xx}} (F_4 - F_2), \quad (4)$$

$$\ddot{K} = \frac{l}{J_{yy}} (F_3 - F_1), \quad (5)$$

$$\ddot{R} = \frac{lb}{J_{zz} K_T} (F_1 - F_2 + F_3 - F_4), \quad (6)$$

$$F_i = K_T \omega_i^2. \quad (7)$$

Здесь приняты следующие обозначения: J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} – моменты инерции квадрокоптера вокруг соответствующих осей; m – масса квадрокоптера; l – расстояние от центра квадрокоптера до мест крепления электродвигателей; b – технологический коэффициент; A_x, A_y, A_z – коэффициенты удельного сопротивления; ω – частота вращения вала двигателя.

Конкретные значения квадрокоптера: $m = 0.5$ кг; $l = 0.25$ м; $K_T = 4 \cdot 10^{-5}$ (Н·с²/рад²); $b = 1.2 \cdot 10^{-7}$ (Н·м·с²/рад²); $A_x = A_y = A_z = 1$ кг/с; $J_{xx} = J_{yy} = 5 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $J_{zz} = 9 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $\omega_{\text{макс}} = 300$ рад/с.

Так как предполагается плавное движение КК с малыми углами крена и тангажа, то $\cos T \approx \cos K \approx \cos R \approx 1$, а $\sin T \approx T$, $\sin K \approx K$, $\sin R \approx 0$. Кроме того, предполагая плавное движение в плоскости XOY , т.е. выполнение условия

$(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) = mg$, уравнения (1)–(7) можно преобразовать к следующему виду:

$$\ddot{X} = K_{Tx}(T) - \frac{A_x}{m} \dot{X}, \quad (8)$$

$$\ddot{Y} = -K_{Ky}(K) - \frac{A_y}{m} \dot{Y}, \quad (9)$$

$$\ddot{Z} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{m} - \frac{A_z}{m} \dot{Z} - g, \quad (10)$$

$$\ddot{T} = \frac{l}{J_{xx}}(F_4 - F_2), \quad (11)$$

$$\ddot{K} = \frac{l}{J_{yy}}(F_3 - F_1), \quad (12)$$

$$\ddot{R} = \frac{lb}{J_{zz} \times K_T}(F_1 - F_2 + F_3 - F_4). \quad (13)$$

Здесь приняты обозначения: K_{Tx} , K_{Ky} – коэффициенты взаимовлияния по соответствующим координатам (X , Y) квадрокоптера.

Для исключения возможных неопределенностей в понимании дальнейшего материала введем понятие ИИУС КК.

Под ИИУС КК понимают совокупность технических средств и программного обеспечения, осуществляющую сбор, хранение и обработку информации о параметрах движения, а также выработку управляющих воздействий на элементы управления [7].

Для определения параметров координат квадрокоптера применяют следующие основные датчики [8–11].

Барометр представляет собой прибор для измерения давления, по показаниям которого можно судить о высоте полета. Наименьшей погрешностью определения высоты обладает комбинация датчика давления и высоты GPS. Параметры широко применяемого барометра MS5611 (компания MEAS Switzerland) следующие:

- измеряемое давление: от 10 гПа до 1200 гПа;
- точность: до 0.1 м в самом точном режиме;
- время измерения: до 10 мс.

Ультразвуковой датчик представляет собой прибор для получения надежной информации о расстоянии до крупных целей даже в средах с сильными акустическими или электрическими источниками шума. Параметры широко применяемого ультразвукового датчика I2XL-MaxSonar-EZ4 следующие:

- интервал считывания показаний 67 мс (15 Гц);
- максимальное расстояние: 765 см;
- разрешение в диапазоне от 25 до 765 см: –0.1 м.

Магнитометр – это электронный компас, дающий информацию о полете относительно магнитного поля Земли и размещенный на плате контроллера.

Гироскоп – прибор для измерения скорости изменения углов (как правило, их измеряют по трем осям).

Акселерометр представляет собой прибор для измерения линейного ускорения КК в трехосевой системе. Параметры широко применяемого, совмещенного в одном корпусе гироскопа и акселерометра MPU6050 следующие:

- гироскоп, диапазон: ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 °/с;
- акселерометр, диапазон: ± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16 g.

Видеокамера представляет собой прибор для записи фиксируемого изображения. Параметры широко применяемой видеокамеры Stack-X-1080P следующие:

- фокусное расстояние камеры: 2.8 мм;
- угол объектива камеры: Н: 130°, В: 98°;
- датчик камеры: 1/2.5 дюймов CMOS;
- частота кадров DVR: 60 кадров в секунду;
- формат видео: NTSC или PAL.

Модуль навигации GPS ГЛОНАСС (например, Flight control PCBA - H507A-05) позволяет отслеживать и измерять такие параметры, как расстояние, скорость и время. Это фактически и система слежения, позволяющая определять точное местоположение аппарата.

Модуль контроллера полета позволяет квадрокоптеру отслеживать свое текущее положение и скорость. Кроме того, он получает сигналы от передатчика оператора. Контроллер полета взаимодействует с датчиками, размещенными на борту КК для обеспечения плавного полета, а именно: акселерометром, гироскопами и т.п. Помимо этого контроллер полета вычисляет скорость каждого из четырех двигателей и отправляет сигналы управления на электронные контроллеры скорости или ESC.

Регулируемые по скорости электроприводы (РЭП) играют важную роль в квадрокоптерах. РЭП состоят из блока управления – в англоязычном сообществе его называют «Electric Speed Controller» (электронный контроллер скорости) или сокращенно ESC – и электродвигателя. Существенно, что в настоящее время в качестве электродвигателей в квадрокоптерах применяются как магнитоэлектрические двигатели постоянного тока, так и вентильные двигатели. Однако в последнее время стали широко использоваться вентильные электродвигатели (ВД), что связано с их хорошими эксплуатационными характеристиками [12]: большим удельным моментом, малой инерционностью, простотой управления.

Параметры широко применяемого РЭП, состоящего из блока управления ESC HW30A и электродвигателя Walkera QR X350, следующие: напряжение

питания – 12 В; максимальный ток – 30 А; номинальная частота вращения ротора – 314 рад/с.

Перейдем к разработке функциональной схемы и математической модели ИИУС КК, уделяя особое внимание ее компонентам [13–16]. При этом пристальное внимание обратим на величины запаздываний поступления информации с соответствующих датчиков параметров квадрокоптера – по положению координат и их скоростям. Эти запаздывания будем учитывать в виде постоянных времени передаточных функций соответствующих датчиков.

С учетом представленных выше уравнений были разработаны функциональная и структурная схема ИИУС КК, представленные на рис. 3 и рис. 4.

Приняты следующие обозначения: $РП_z$, $РП_x$, $РП_y$, $РП_r$, $РП_k$, $РП_r$ – соответственно регуляторы положений по координатам Z , X , Y , T , K , R ; РЭП1 – РЭП4 – четыре регулируемых по скорости электропривода; $РС_r$, $РС_k$ и $РС_r$ – регуляторы скорости по координатам T , K и R ; $ДП_z$, $ДП_x$, $ДП_y$, $ДП_r$, $ДП_k$, $ДП_r$ – соответственно датчики положений по координатам Z , X , Y , T , K , R ; $ДС_r$, $ДС_k$, $ДС_r$ – датчики скорости по координатам T , K и R ; КУ1, КУ2 – корректирующие элементы; U_{3z} , U_{3x} , U_{3y} , U_{3r} , U_{3k} , U_{3r} – соответственно сигналы задания положений по координатам Z , X , Y , T , K , R ; $U_{Дz}$, $U_{Дx}$, $U_{Дy}$, $U_{Дr}$, $U_{Дk}$, $U_{Дr}$ – соответственно сигналы с датчиков положения координат Z , X , Y , T , K , R ; $U_{РПz}$, $U_{РПr}$ – соответственно выходные сигналы с регуляторов положения координат Z и R ; U_{3r} , U_{3k} – сигналы задания координат T и K ; U_{3Cr} , U_{3Ck} , U_{3Cr} – сигналы задания скоростей координат T , K , R ; $U_{ДСr}$, $U_{ДСk}$, $U_{ДСr}$ – сигналы с датчиков скорости координат T , K , R ; $U_{РСr}$, $U_{РСk}$, $U_{РСr}$ – сигналы с регуляторов скорости координат T , K , R ; F_z – сила тяги по координате Z ; P – вес КК; V_z – скорость перемещения по координате Z ; M_r , V_t – соответственно момент и скорость по координате T ; M_k , V_k – соответственно момент и скорость по координате K ; M_r , V_r – соответственно момент и скорость по координате R ; K_{tz} , K_{tr} , K_{tk} , K_{tr} – физические коэффициенты; $W_{РПz}(S)$, $W_{РПx}(S)$, $W_{РПy}(S)$, $W_{РПr}(S)$, $W_{РПk}(S)$, $W_{РПr}(S)$ – соответственно передаточные функции регуляторов положений по координатам Z , X , Y , T , K , R ; $W_{РСr}(S)$, $W_{РСk}(S)$ – соответственно передаточные функции регуляторов скорости по координатам T , K ; S – оператор Лапласа; $K_{РЭП}$, $T_{РЭП}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени РЭП; $K_{ДПz}$, $T_{ДПz}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате Z ; $K_{ДПx}$, $T_{ДПx}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате X ; $K_{ДПy}$, $T_{ДПy}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная

времени датчика положения по координате Y ; $K_{ДПr}$, $T_{ДПr}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате R ; $K_{ДПk}$, $T_{ДПk}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате K ; $K_{ДПr}$, $T_{ДПr}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате R ; $K_{ДСr}$, $T_{ДСr}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика скорости по координате T ; $K_{ДСk}$, $T_{ДСk}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика скорости по координате K ; $K_{ДСr}$, $T_{ДСr}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика скорости по координате R ; K_{vz} , T_{vz} – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени узла скорости по координате Z ; K_{vx} , T_{vx} – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени узла скорости по координате X ; K_{vy} , T_{vy} – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени узла скорости по координате Y ; K_{vt} – коэффициент передачи узла скорости по координате T ; K_{vk} – коэффициент передачи узла скорости по координате K ; K_{vr} – коэффициент передачи узла скорости по координате R ; $F_{РПz}$, $F_{РПx}$, $F_{РПy}$, $F_{РПr}$, $F_{РПk}$, $F_{РПr}$ – соответственно нелинейности регуляторов положений по координатам Z , X , Y , T , K , R ; F_1 , F_2 – нелинейности корректирующих устройств; $F_{РСr}$, $F_{РСk}$ – нелинейности регуляторов скорости по координатам T и K .

Контуры управления координатами КК настраивают на технический и симметричный оптимумы [17]. Конкретные значения ИИУС КК приведены ниже.

Для контура управления по координате Z :
 $K_{tz} = 4 \cdot 10^{-5}$ (Н·с²)/рад²; $K_{vz} = 5$ (1/с); $T_{vz} = 2$ с; $K_{РЭП} = 2.5$ рад/(дискрет·с); $T_{РЭП} = 0.001$ с; $K_{ДПz} = 1$; $T_{ДПz} = 0.01$ с. Контур настроен на технический оптимум, в этом случае

$$W_{РПz}(S) = 5000(1 + 0.5S)/(1 + 0.05S).$$

Для контура управления по координате X :
 $K_{tx} = 4 \cdot 10^{-5}$ (Н·с²)/рад²; $K_{vx} = 50$ 1/(кг·м²); $K_{vx} = 50$ (1/с); $T_{vx} = 2$ с; $K_{ДСr} = 1$; $T_{ДСr} = 0.01$ с; $K_{ДПx} = 1$; $T_{ДПx} = 0.05$ с; U_{Cz} , U_{Cr} , U_{Ck} , U_{Cr} – сигналы с выходов нелинейностей $F_{РПz}$, $F_{РСr}$, $F_{РСk}$, $F_{РСr}$; $U_{РПx}$, $U_{РПy}$, $U_{РПz}$, $U_{РПr}$, $U_{РПk}$ – выходные сигналы по координатам X , Y , Z , R , T , K ; V_x , V_y – скорость по координатам X и Y .

Контур скорости по координате T настроен на технический оптимум: $W_{РСr}(S) = 500$.

Контур положения по координате T настроен на технический оптимум, тогда $W_{РПr}(S) = 500$.

Контур положения по координате X настроен на технический оптимум, в этом случае

$$W_{РПx}(S) = 0.1(1 + 0.5S)/(1 + 0.05S).$$

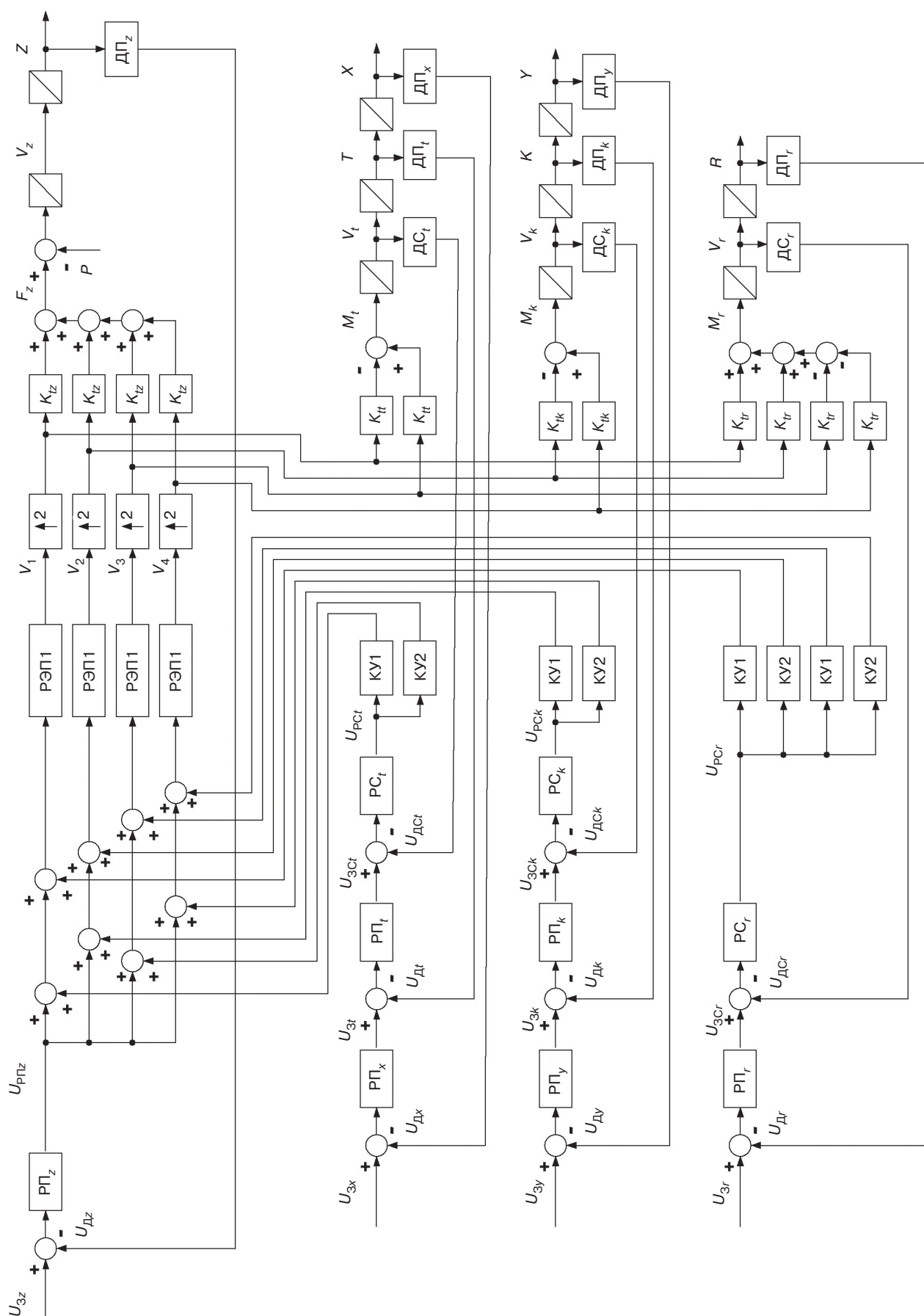


Рис. 3. Функциональная схема ИИУС КК

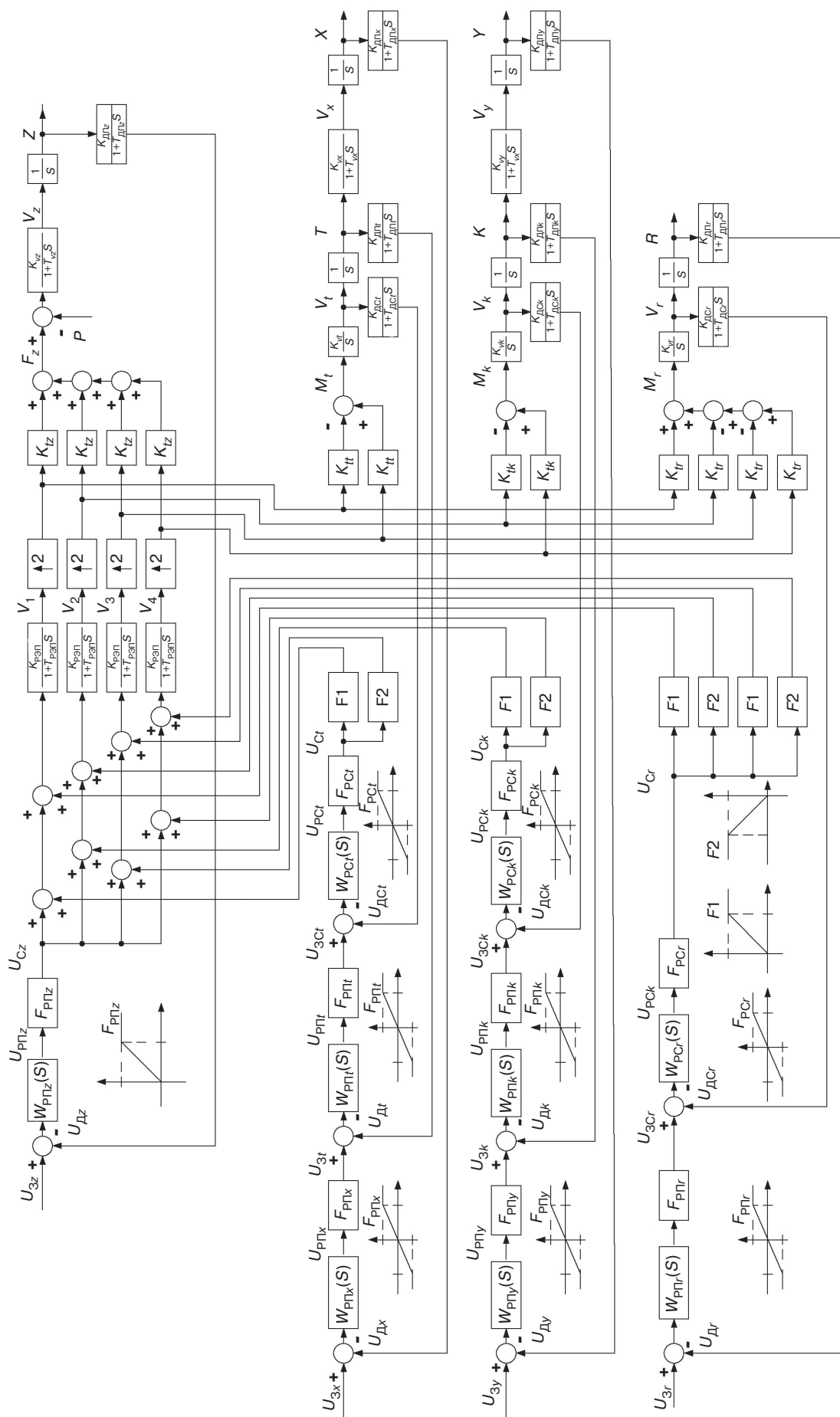


Рис. 4. Структурная схема ИИУС КК

Для контура управления по координате Y : $K_{yk} = 4 \cdot 10^{-5}$ (Н·с²)/рад²; $K_{yk} = 50$ 1/(кг·м²); $K_{yy} = 50$ (1/с); $T_{yy} = 2$ с; $K_{ДСk} = 1$; $T_{ДСk} = 0.01$ с; $K_{ДПk} = 1$; $T_{ДПk} = 0.05$ с; $K_{ДПy} = 1$; $T_{ДПy} = 0.05$ с.

Контур скорости по координате K настроен на технический оптимум, тогда $W_{РСК}(S) = 500$.

Контур положения по координате K настроен на технический оптимум: $W_{РПК}(S) = 500$.

Контур положения по координате Y настроен на технический оптимум, в этом случае

$$W_{РПy}(S) = 0.1(1 + 0.5S)/(1 + 0.05S).$$

Для контура управления по координате R : $K_{rr} = 4 \cdot 10^{-5}$ (Н·с²)/рад²; $K_{vr} = 50$ 1/(кг·м²); $K_{ДСr} = 1$; $T_{ДСr} = 0.01$ с; $K_{ДПr} = 1$; $T_{ДПr} = 0.01$ с.

Контур скорости по координате R настроен на технический оптимум, тогда $W_{РСК}(S) = 500$.

Контур положения по координате R настроен на технический оптимум, в этом случае $W_{РПК}(S) = 500$.

Так как все системы управления координатами квадрокоптера осуществляют свои функции через 4 исполнительных электродвигателя, то между ними существует сильное взаимовлияние, которое необходимо учитывать при работе.

В работе исследовался следующий достаточно простой, но показательный алгоритм работы ИИУС КК: подъем квадрокоптера на высоту 1 м; через 1 с движение квадрокоптера вправо на 1 м; движение квадрокоптера влево на 1 м. В этом случае в квадрокоптере задействованы системы управления координатой Z , координатой X , а также координатой T (как промежуточной). Принципиально важно наблюдать при работе системы управления по одной координате (например, X) за ее влиянием на работу системы управления по другой координате (например, Z). В случае правильно выбранных регуляторов такое влияние должно быть минимальным.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Поведение синтезированной ИИУС КК было промоделировано путем подачи на вход системы управления координатой Z ступенчатого сигнала амплитудой 1 м, а на вход системы управления координатой X через время, равное 1 с – сигнала типа «меандр» амплитудой 1 м и частотой 0.125 Гц. Результаты моделирования представлены на рис. 5–7.

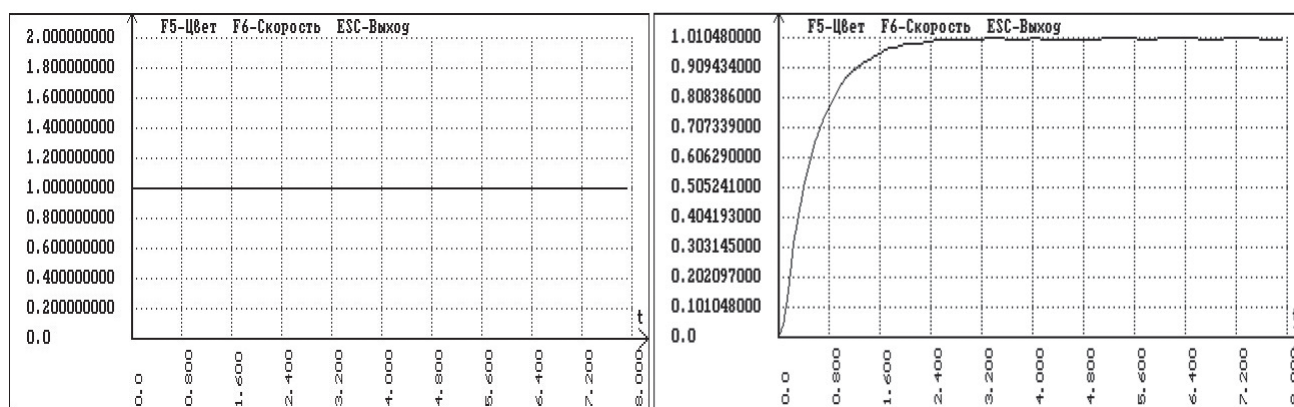


Рис. 5. Сигналы задания положения по координате Z – (а) и реального положения – (б)

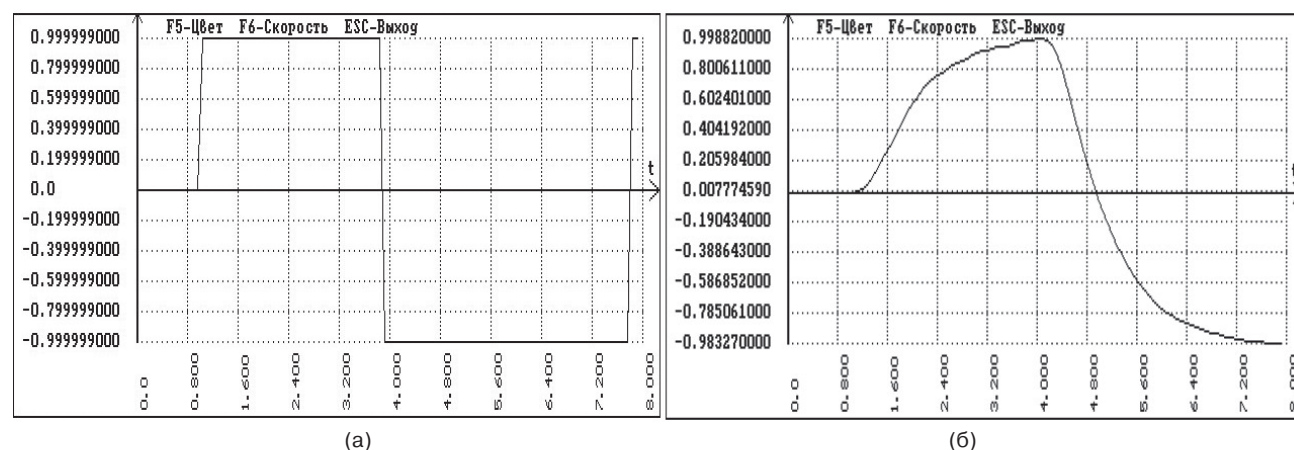


Рис. 6. Сигналы задания положения по координате X – (а) и реального положения – (б)

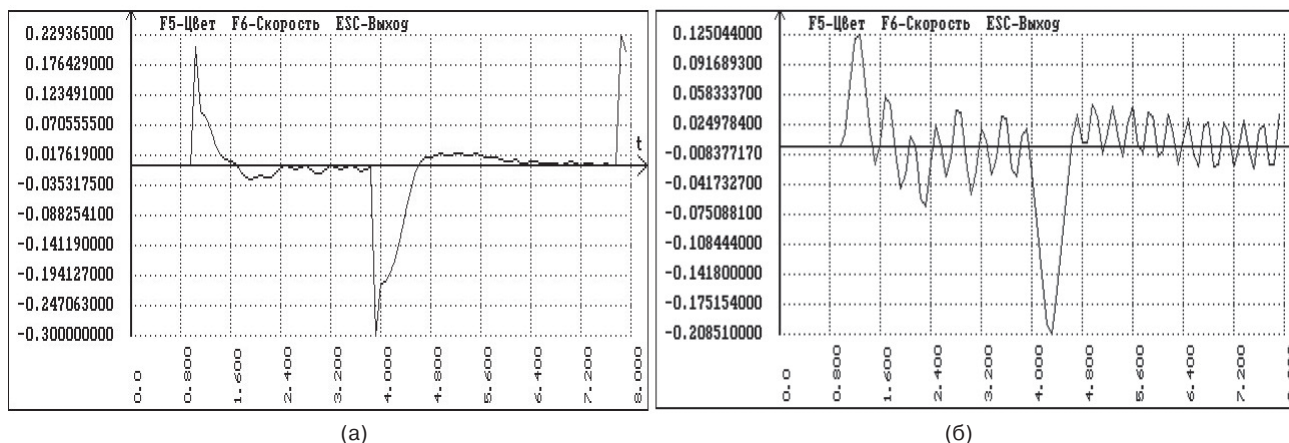


Рис. 7. Сигналы задания положения по координате T – (а) и реального положения – (б)

Анализ рис. 5–7 показывает, что синтезированная ИИУС в составе КК обладает хорошими регулировочными характеристиками – отсутствием перерегулирования и малой статической ошибкой (менее 10 мм). Следует отметить, что такие хорошие показатели были получены при условии неучета погрешностей датчиков параметров координат квадрокоптера. В случае их учета статические ошибки существенно возросли.

Кроме того, видно, что регуляторы систем управления координатами ИИУС КК нейтрализуют взаимовлияния координат.

Необходимо отметить, что при изменении параметров регуляторов координат в сторону ухудшения характеристик контуров управления наблюдаются эффекты взаимовлияния координат – появление небольших перемещений одних координат при работе других и т.д.

ВЫВОДЫ

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

- ИИУС КК целесообразно выполнить в виде 4 контуров управления координатами X , Y , Z , R ;
- контуры управления координатами T и K следует подчинить регуляторам положения контуров управления координат X и Y ;
- контуры управления координатами следует настраивать на оптимум по модулю, что обеспечивает получение плавных переходных процессов (без перерегулирования) и практически исключает взаимовлияние координат друг на друга.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарев А.Н., Киричек Р.В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах. *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016;4(4):13–23. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/20164/13-23.pdf>
2. Подрезов Ю.В. Особенности применения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга чрезвычайных лесопожарных ситуаций. *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2019;3:64–72. URL: <http://lamb.viniti.ru/sid2/sid2free?sid2=J17785461>
3. Джунипер А. Дроны. *Полное практическое руководство*: пер. с англ. М.: КоЛибри; 2019. 159 с. ISBN 978-5-389-15611-1
4. Гололобов В.Н., Ульянов В.И. *Беспилотники для любознательных*. СПб: Наука и Техника (НиТ); 2018. 249 с. ISBN 978-5-94387-878-7
5. Ющенко А.С., Лебедев К.Р., Забихафар С.Х. Система управления квадрокоптером на основе адаптивной нейронной сети. *Наука и Образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2017;7:262–267.

REFERENCES

1. Bondarev A.N., Kirichek R.V. Overview of unmanned aerial apparatus for general use and regulation of air UAV movement in different countries. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii = Telecom IT*. 2016;4(4):13–23 (in Russ.). Available from URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/20164/13-23.pdf>
2. Podrezov Yu.V. Features of the use of unmanned aerial vehicles to monitor the forest fire emergency situations. *Problemy bezopasnosti i chrezvychainykh situatsii = Safety and Emergencies Problems*. 2019;3:64–72 (in Russ.). Available from URL: <http://lamb.viniti.ru/sid2/sid2free?sid2=J17785461>
3. Juniper A. *The Complete Guide to Drones: Whatever your budget - Build + Choose + Fly + Photograph*. New York: Wellfleet Press; 2016. 144 p. [Juniper A. *Drones. Complete practical guide*. Moscow: KoLibri; 2019. 159 p. (in Russ.). ISBN 978-5-389-15611-1]
4. Gololobov V.N., Ul'yanov V.I. *Bespilotniki dlya lyuboznatel'nykh (Drones for the curious)*. Saint-Petersburg: Nauka i Tekhnika (NiT); 2018. 249 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94387-878-7

6. Luukkonen T. *Modelling and Control of Quadcopter. School of Science*. Espoo; 2011. 26 p. URL: https://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/eluu11_public.pdf
7. Рокачевский О.А., Слепцов В.В., Аблаева А.Е., Динь Ба Фыонг. Синтез контура управления координатой высоты информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2021;1:38–43.
8. Чулин Н.А., Миронова И.В. Система управления беспилотным летательным аппаратом. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2018;9(81):1–11. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-9-1802>
9. Куликов Г.В., Тамбовский С.С. Оценка качества связи с БПЛА в условиях городской застройки. *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2015;1(6):205–217.
10. Соловьев В.В., Финаев В.И., Шадрина В.В., Пушкина И.В. Навигация для обеспечения коммуникаций в группе подвижных объектов. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2018;3(197):102–112. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2018-3-102-112>
11. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Попков М.А. Проектирование квадрокоптера на базе интегрированной модельной среды. *Инженерные технологии и системы*. 2019;29(2):169–186. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.169-186>
12. Высоцкий В.Е., Воронин С.М., Горшков Р.Г. Имитационное моделирование электромагнитных и электромеханических процессов вентильного двигателя. *Вестник ИГЭУ*. 2011;1:54–57. URL: http://vestnik.ispu.ru/sites/vestnik.ispu.ru/files/publications/54-57_2.pdf
13. Савицкий А.В., Павловский В.Е. Модель квадрокоптера и нейросетевой алгоритм управления. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2017;77. 20 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2017-77>
14. Павловский В.Е., Савицкий А.В. Исследование обратной задачи для вычисления управляющих воздействий для квадрокоптера. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2017;17. 19 с. <http://doi.org/10.20948/prepr-2017-17>
15. Красовский А.Н., Суслова О.А. Об оптимальном управлении движением дрона-квадрокоптера по критерию качества затрат энергии. *Успехи современной науки и образования*. 2017;4(3):193–197.
16. Савин С.И., Ворочаева Л.Ю., Савин А.И. Метод генерации оптимальных траекторий квадрокоптера посредством выпуклого программирования. *Вестник ВГТУ*. 2018;14(5):54–63. URL: https://cchgeu.ru/science/nauchnye-izdaniya/vestnik-voronezhskogo-gosudarstvennogo-tekhnicheskogo-universiteta/-bulletin-of-voronezh-state-technical-university/the-issues-of-the-journal-the-bulletin-of-voronezh-state-technical-university/14_5.pdf
17. Гарипов В.К., Прокуратов И.И., Слепцов В.В. *ИИУС электроприводов для автоматизированного производства*. Саарбрюккен: Lap Lambert, Academic Publishing; 2014. 131 с.
5. Yushenko A.S., Lebedev K.R., Zabihaifar S.H. The adaptive neural network control of quadrotor helicopter. *Nauka i Obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman. = Science & Education. Scientific Education of Bauman MSTU*. 2017;7:262–267 (in Russ.).
6. Luukkonen T. *Modelling and Control of Quadcopter. School of Science*. Espoo; 2011. 26 p. Available from URL: https://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/eluu11_public.pdf
7. Rokachevsky O.A., Sleptsov V.V., Ablaeva A.E., Dinh Ba Phuong. Synthesis of the height coordinate control loop of the information-measuring and control system of the quadcopter. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya. = Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2021;1:38–43 (in Russ.).
8. Chulin N.A., Mironova I.V. Control system of unmanned aerial vehicle. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering J: Science and Innovation*. 2018;9(81):1–11 (in Russ.). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-9-1802>
9. Kulikov G.V., Tambovsky S.S. Assessment of the quality of communication with the UAV in urban terrain. *Vestnik MGTU MIREA = Herald of MSTU MIREA*. 2015;1(6):205–217 (in Russ.).
10. Solov'ev V.V., Finaev V.I., Shadrina V.V., Pushkina I.V. Navigation for communication in a group of vehicles. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2018;3(197):102–111 (in Russ.). <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2018-3-102-112>
11. Chugunov M.V., Polunina I.N., Popkov M.A. The quadcopter design based on integrated model environment. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy = Engineering technologies and systems*. 2019;29(2):169–186 (in Russ.). <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.169-186>
12. Vysocky V.E., Voronin S.M., Gorshkov R.G. Simulation of electromagnetic and electromechanical processes of thyatron motor. *Vestnik IGEU = Vestnik of Ivanovo Power Engineering Institute*. 2011;1:54–57 (in Russ.). Available from URL: http://vestnik.ispu.ru/sites/vestnik.ispu.ru/files/publications/54-57_2.pdf
13. Savickij A.V., Pavlovsky V.E. Model of quadcopter and algorithm of vehicle control based on neural network. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha = Keldysh Institute Preprints*. 2017;77. 20 p. (in Russ.). <https://doi.org/10.20948/prepr-2017-77>
14. Pavlovskiy V.E., Savickij A.V. The solving of the inverse problem for computation control action for quadcopter. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha = Keldysh Institute Preprints*. 2017;17. 19 p. (in Russ.). <http://doi.org/10.20948/prepr-2017-17>
15. Krasovskij A.N., Suslova O.A. On the optimal control of the movement of a drone - quadcopter by the criterion of the quality of energy consumption. *Uspekhi sovremennoi nauki i obrazovaniya = Achievements of modern science and education*. 2017;4(3):193–197 (in Russ.).
16. Savin S.I., Vorochaeva L.Yu., Savin A.I. Optimal trajectory generation for a quadrotor using convex programming. *Vestnik VGTU = The Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2018;14(5):54–63 (in Russ.). Available from URL: https://cchgeu.ru/science/nauchnye-izdaniya/vestnik-voronezhskogo-gosudarstvennogo-tekhnicheskogo-universiteta/-bulletin-of-voronezh-state-technical-university/the-issues-of-the-journal-the-bulletin-of-voronezh-state-technical-university/14_5.pdf

17. Garipov V.K., Prokuratov I.I., Sleptsov V.V. *IIUS elektropriivodov dlya avtomatizirovannogo proizvodstva (Information-Measuring and Control Systems of Electric Drives for Automated Production)*. Saarbrücken: Lap Lambert, Academic Publishing; 2014. 131 p. (in Russ.).

Об авторах

Слепцов Владимир Владимирович, д.т.н., профессор, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sleptsov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1003-8411>

Афонин Вячеслав Леонидович, д.т.н., главный научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101990, Россия, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4). E-mail: afoninwl@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3824-0707>

Аблаева Анна Евгеньевна, старший преподаватель, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ablaeva@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1767-5413>

Динь Ба Фьонг, аспирант, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nhoht_ck49@yahoo.com. <https://orcid.org/0000-0001-6153-4776>

About the authors

Vladimir V. Sleptsov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Instruments, Information and Measurement Systems, Institute of Integrated Safety and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sleptsov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1003-8411>

Vyacheslav L. Afonin, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (4, Maly Kharitonyevsky pereulok, Moscow, 101990 Russia). E-mail: afoninwl@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3824-0707>

Anna E. Ablaeva, Senior Lecturer, Department of Instruments, Information and Measurement Systems, Institute of Integrated Safety and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ablaeva@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1767-5413>

Dinh Ba Phuong, Postgraduate Student, Department of Instruments, Information and Measurement Systems, Institute of Integrated Safety and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: nhoht_ck49@yahoo.com. <https://orcid.org/0000-0001-6153-4776>