

УДК 621.311
doi:10.21685/2307-5538-2022-2-2

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КВАДРОКОПТЕРА В КОНТУРАХ УПРАВЛЕНИЯ КООРДИНАТАМИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

В. В. Слепцов¹, А. Е. Аблаева², Динь Ба Фьонг³

^{1,2,3}МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
¹vsleptsov@gmail.com, ²ablaeva@gmail.com, ³nhoh_t_ck49@yahoo.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одной из важных задач при проектировании квадрокоптера является разработка информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера. *Материалы и методы.* Данная система должна обеспечивать полет квадрокоптера с максимальной независимостью от внешних возмущений. Так как информационно-измерительная и управляющая система включает в себя инерционные датчики, которые существенно ухудшают характеристики контура управления квадрокоптера, то в данной статье рассмотрена задача синтеза контура управления одной из координат в горизонтальной плоскости информационно-измерительной и управляющей системы с существенным повышением качества управления движением квадрокоптера за счет внедрения идентификаторов состояния. *Результаты и выводы.* Данная система служит для мониторинга квадрокоптером различных объектов и его способности преодолевать возмущения в неопределенных ситуациях.

Ключевые слова: квадрокоптер, идентификатор, передаточная функция, регулятор положения

Для цитирования: Слепцов В. В., Аблаева А. Е., Динь Ба Фьонг. Повышение качества переходных процессов информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера в контурах управления координатами в горизонтальной плоскости // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 13–20. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-2

IMPROVING TRANSITION QUALITY OF THE INFORMATION- MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF THE QUADROCOPTER IN THE CONTROL CIRCUITS IN THE HORIZONTAL PLANE

V.V. Sleptsov¹, A.E. Ablaeva², Dinh Ba Phuong³

^{1,2,3}MIREA – Russian Technological University, IKBSP, Moscow, Russia
¹vsleptsov@gmail.com, ²ablaeva@gmail.com, ³nhoh_t_ck49@yahoo.com

Abstract. *Background.* One of the important tasks in the design of a quadcopter is the development of an information-measuring and control system of a quadcopter. *Materials and methods.* This system should provide quadcopter years with the maximum reduction of external disturbances. Since the information-measuring and control system includes inertial sensors, which significantly degrade the characteristics of the control loop of the spacecraft. To solve these problems, this article considers the problem of synthesizing a control loop of one of the coordinates in the horizontal plane of an information-measuring and control system with a quadcopter state identifier. The aim of the work is to improve the quality of control of the movement of the quadcopter based on the introduction of state identifiers in the information-measuring and control system of the quadcopter. *Results and conclusions.* This system serves for the capable monitoring of various objects of the quadcopter and its ability to overcome disturbances in uncertain situations.

Keywords: quadcopter, identifier, transfer function, position controller

For citation: Sleptsov V.V., Ablaeva A.E., Dinh Ba Phuong. Improving transition quality of the information-measuring and control system of the quadcopter in the control circuits in the horizontal plane. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):13–20. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-2

Введение

В настоящее время современные квадрокоптеры (КК) должны обладать не только устойчивостью, компактностью, но и способностью преодоления возмущений в неопределенных ситуациях. Качественные характеристики в управлении квадрокоптером зависят от многих его технических систем. Одной из важнейших систем КК является информационно-измерительная и управляющая система (ИИУС), которая представляет собой совокупность технических средств и программного обеспечения, осуществляющая сбор и обработку измерительной информации об объекте и выработку необходимых управляющих воздействий на объект.

Теоретическая часть

Динамику квадрокоптера можно описать системой дифференциальных уравнений, которая имеет следующий вид [1, 2]:

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = \frac{F1 + F2 + F3 + F4}{m} [\cos(R)\sin(T)\cos(K) + \sin(R)\sin(K)] - \frac{A_x}{m} \frac{dX}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} = \frac{F1 + F2 + F3 + F4}{m} [\sin(R)\sin(T)\cos(K) + \cos(R)\sin(K)] - \frac{A_y}{m} \frac{dY}{dt}, \quad (2)$$

$$\frac{d^2 Z}{dt^2} = \frac{F1 + F2 + F3 + F4}{m} \cos(T)\cos(K) - \frac{A_z}{m} \frac{dZ}{dt} - g, \quad (3)$$

$$\frac{d^2 T}{dt^2} = \frac{l}{J_{xx}} (F4 - F2), \quad (4)$$

$$\frac{d^2 K}{dt^2} = \frac{l}{J_{yy}} (F3 - F1), \quad (5)$$

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{lb}{J_{zz} K_T} (F1 - F2 + F3 - F4), \quad (6)$$

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

Здесь приняты следующие обозначения: F_i – силы тяги винтов ($i = 1 \dots 4$); 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; K_T – физический коэффициент; X, Y, Z – координаты центра масс КК; R – угол рыскания; T – угол тангажа; K – угол крена; g ускорение свободного падения; ω_i – угловая скорость вращения i -го винта ($i = 1 \dots 4$);

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. Эти уравнения (1)–(7) позволяют разработать функциональную схему ИИУС КК, которая и представлена на рис. 1 [1, 2].

Приняты следующие обозначения: РПz, РПx, РПу, РПт, РПк, РПг – регуляторы положений по координатам Z, X, Y, T, K, R соответственно; РЭП1 – РЭП4 – четыре регулируемых по скорости электропривода; РСт, РСк и РСг – регуляторы скорости по координатам T, K и R ; ДПz, ДПx, ДПу, ДПт, ДПк, ДПг – датчики положений по координатам Z, X, Y, T, K, R соответственно; ДСт, ДСк, ДСг – датчики скорости по координатам T, K и R ; КУ1, КУ2 – корректирующие элементы; $U_{zz}, U_{zx}, U_{zy}, U_{zT}, U_{zk}, U_{zr}$ – сигналы задания положений по координатам Z, X, Y, T, K, R соответственно; $UpPz, UpPr$ – выходные сигналы с регуляторов положения координат Z и R соответственно; UzT, UzK – сигналы задания координат T и K ; $UzсT, UzсK, UzсR$ – сигналы задания скоростей координат T, K и R ; $UrcT, UrcK, UrcR$ – сигналы с регуляторов скорости координат T, K и R ; Fz – сила тяги по координате Z ; P – вес КК; Vz – скорость перемещения по координате Z ; MT, VT – соответственно момент и скорость по координате T ; $Mk,$

V_k – соответственно момент и скорость по координате K ; M_r, V_r – момент и скорость по координате R соответственно; $K_{Tz}, K_{TT}, K_{Tk}, K_{Tr}$ – физические коэффициенты; $W_{pIz}(S), W_{pIx}(S), W_{pIy}(S), W_{pIT}(S), W_{pIk}(S), W_{pIr}(S)$ – передаточные функции регуляторов положений по координатам Z, X, Y, T, K, R соответственно; $W_{pcT}(S), W_{pcK}(S)$ – передаточные функции регуляторов скорости по координатам T, K соответственно; $K_{рзп}, T_{рзп}$ – коэффициент передачи и постоянная времени РЭП соответственно; $K_{ДПz}, T_{ДПz}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате Z соответственно; $K_{ДПx}, T_{ДПx}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате X соответственно; $K_{ДПу}, T_{ДПу}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате Y соответственно; $K_{ДПТ}, T_{ДПТ}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате T соответственно; $K_{ДПк}, T_{ДПк}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате K соответственно; $K_{ДПр}, T_{ДПр}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате R соответственно; $K_{ДсТ}, T_{ДсТ}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика скорости по координате T соответственно; $K_{Дск}, T_{Дск}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика скорости по координате K соответственно; $K_{Дсr}, T_{Дсr}$ – коэффициент передачи и постоянная времени датчика скорости по координате R соответственно; K_{vz}, T_{vz} – коэффициент передачи и постоянная времени узла скорости по координате Z соответственно; K_{vx}, T_{vx} – коэффициент передачи и постоянная времени узла скорости по координате X соответственно; K_{vy}, T_{vy} – коэффициент передачи и постоянная времени узла скорости по координате Y соответственно; 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 ; $F_{pIz}, F_{pIx}, F_{pIy}, F_{pIT}, F_{pIk}, F_{pIr}, F_{pIz}$ – нелинейности регуляторов положений по координатам Z, X, Y, T, K, R соответственно; F_1, F_2 – нелинейности корректирующих устройств; F_{pcT}, F_{pcK} – нелинейности регуляторов скорости по координатам T и K .

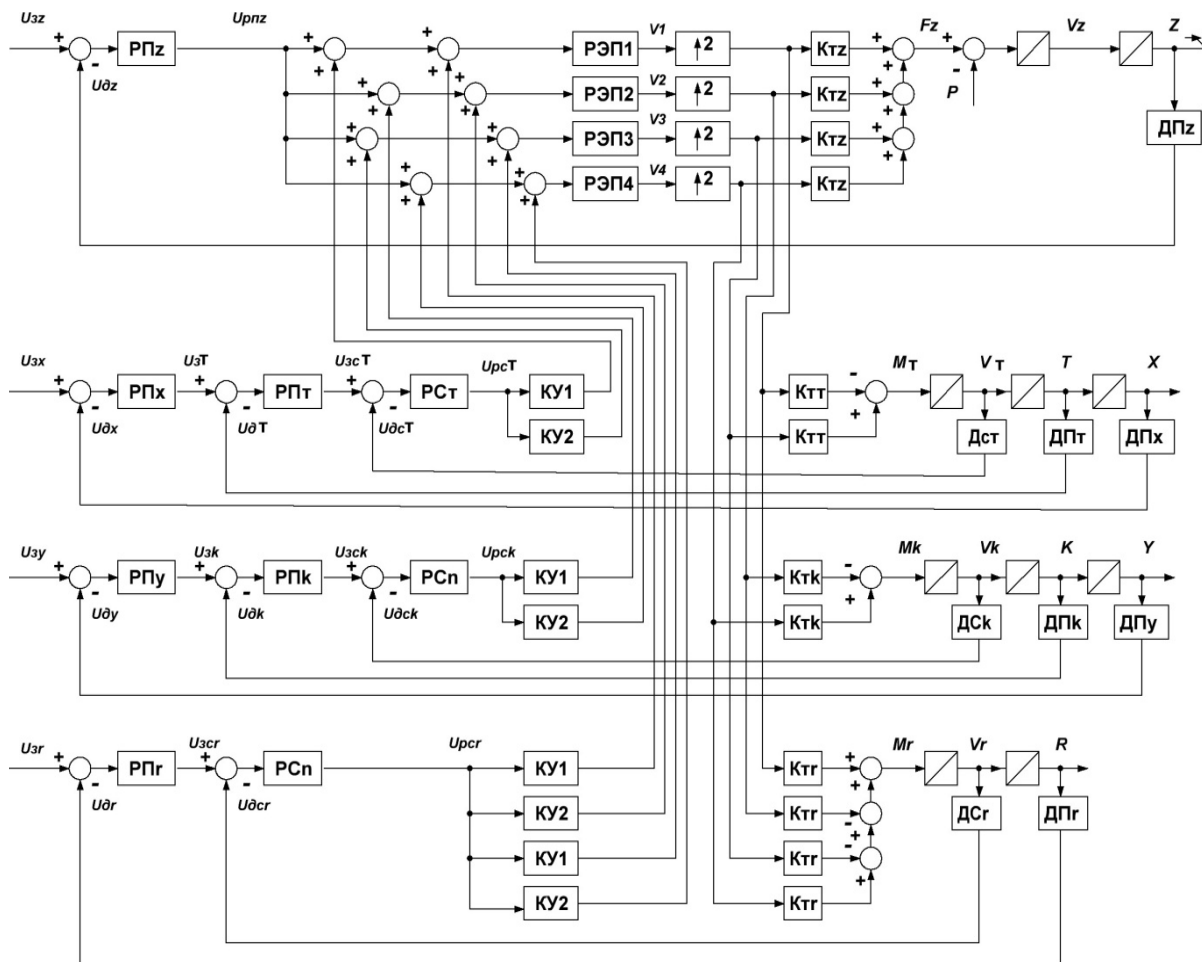


Рис. 1. Функциональная схема ИИУС КК

Анализ результатов работы контура управления координатами в горизонтальной плоскости КК позволит сделать следующие выводы:

- инерционный датчик положения существенно ухудшает характеристики контура управления КК координатами в горизонтальной плоскости, делая его малоработоспособным, особенно при внешних возмущениях;

- в контуре управления по координате X (и Y) необходимо использовать в регулируемых электроприводах по скорости (РЭП) безынерционные датчики положения и скорости.

Однако датчики положения обладают, как правило, инерционностью. Технология изготовления и стоимость у безынерционных датчиков гораздо выше, чем у инерционных, а надежность, наоборот, у безынерционных датчиков хуже. Чтобы сохранить характеристики и цели КК при применении инерционных датчиков, целесообразно применение идентификаторов состояния [2, 3]. Функциональная схема ИИУС КК с идентификатором состояния по координате X и Y представлена на рис. 2.

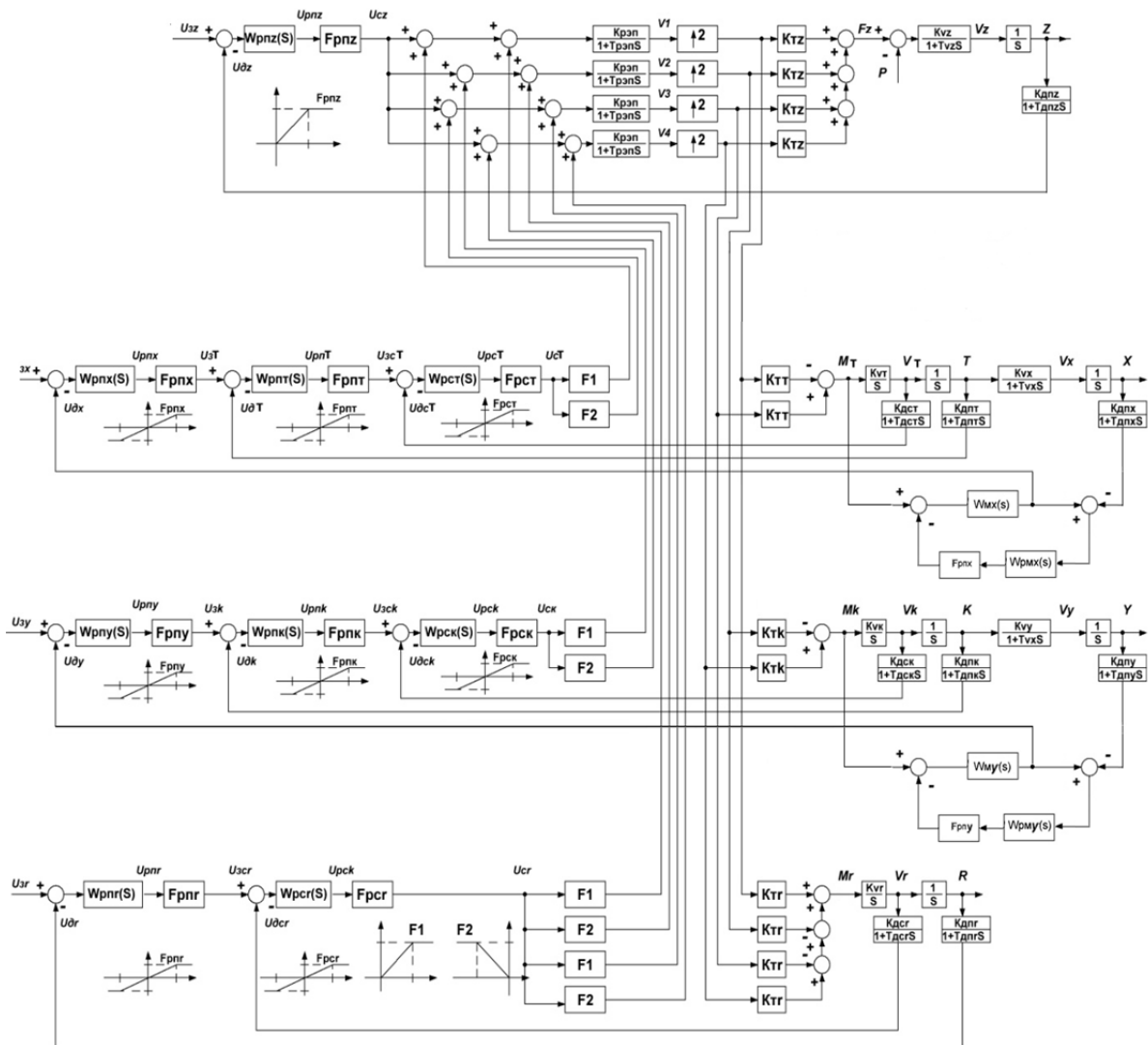


Рис. 2. Функциональная схема с идентификаторами состояния

Так как контур управления ИИУС КК по координате Y аналогичен контуру управления по координате X , поэтому достаточно провести синтез контура управления ИИУС КК по одной координате X . На рис. 3 представлена структурная схема системы управления координатой X с идентификатором состояния. Приняты следующие обозначения: $W_{рпмх}(S)$, $W_{рпму}(S)$ – передаточные функции идентификатора регуляторов положения по координате X и Y соответственно; $F_{рпх}$, $F_{рпу}$ – нелинейности регулятора положения по координате X и Y соответственно; $W_{мх}(S)$, $W_{му}(S)$ – передаточные функции моментов по координате T и K соответственно.

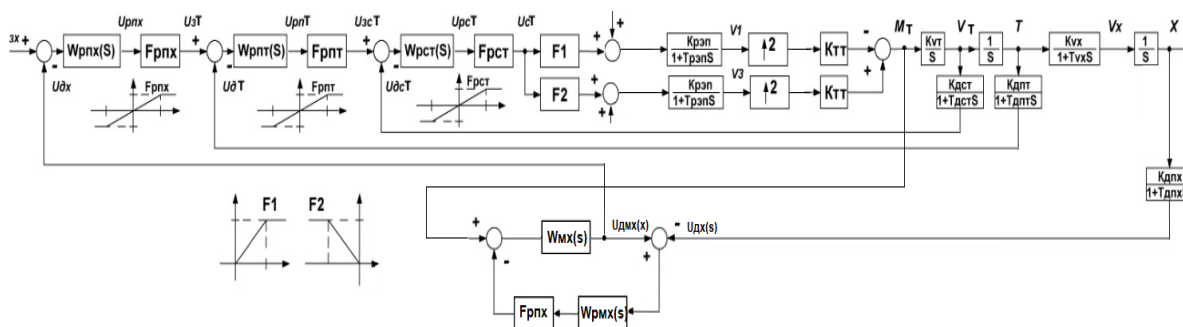


Рис. 3. Структурная схема системы управления координатой X с идентификатором состояния

Внутренний контур идентификации следует настраивать на технический оптимум [8], так как перерегулирование в нем нежелательно, т.е.

$$W_{pm}(S)W_{mx}(S) = \frac{1}{2\tau S(1 + \tau S)}. \tag{8}$$

Выберем

$$W_{mx}(S) = \frac{K_{дп} \frac{K1}{K2}}{S(1 + 0,1T_{дп}S)}. \tag{9}$$

Откуда

$$W_{pm}(S) = \frac{K1}{0,2K2K_{дп}T_{дп}} = K_{pm}. \tag{10}$$

Это передаточная функция П-регулятора.

Моделирование

Поведение синтезированной системы управления координатой X было промоделировано путем подачи на вход системы сигнала типа «ступенька» амплитудой 1 м, для значения постоянной времени датчика положения 0,03 с, без идентификатора и с ним. Результаты моделирования представлены на рис. 4, 5.

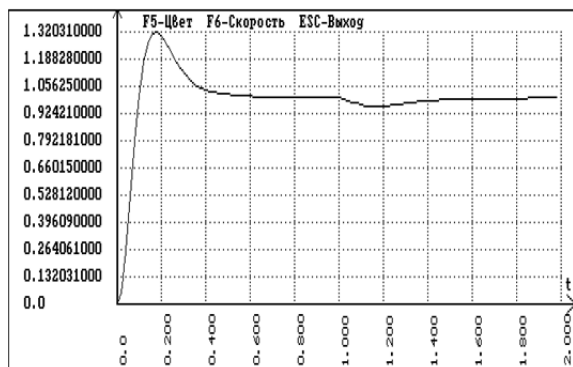


Рис. 4. Сигналы реального положения по координате X при Tдп = 0,03 с без идентификатора состояния

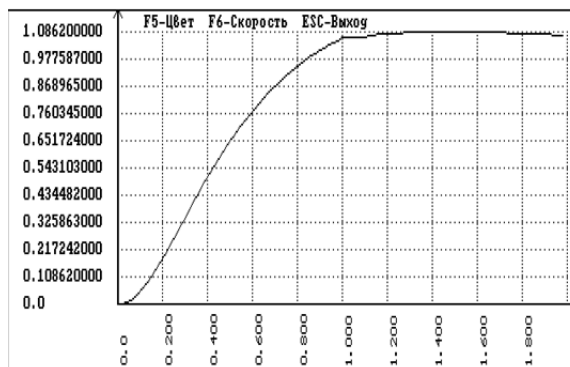


Рис. 5. Сигналы реального положения по координате X при Tдп = 0,03 с с идентификатором состояния

Анализ графиков на рис. 4 и 5 показывает, что синтезированная система управления координатой X ИИУС КК без идентификатора состояния обладает большим перерегулированием (до 32 %) и высокой колебательностью (амплитудой до 8 %), введение идентификатора состояния устраняет эти недостатки.

Проведем проверку контура управления ИИУС КК с идентификатором состояния по координате X при использовании датчиков инерционных и безинерционных при перемещении на 1 м при следующих параметрах: $K_{рп} = 400$; $T_{рп1} = 0,16$ с; $T_{рп2} = 0,1$ с; $K_T = 1 \frac{\text{рад}}{\text{В}}$;

$$T_T = 0,02 \text{ с}; K_2 = 10 \text{ 1/с}; K_1 = 2 \frac{\text{М}}{\text{рад}}; K_{дп} = 1; T_{дп} = 0,03 \text{ с}; K_{рм} = 30 \frac{\text{рад М}}{\text{рад}^2}.$$

Результаты моделирования при позиционном управлении, т.е. при $U_{зпi} = 1(t)$ и $F_c = 10(t - 1)$ представлены на рис. 6.

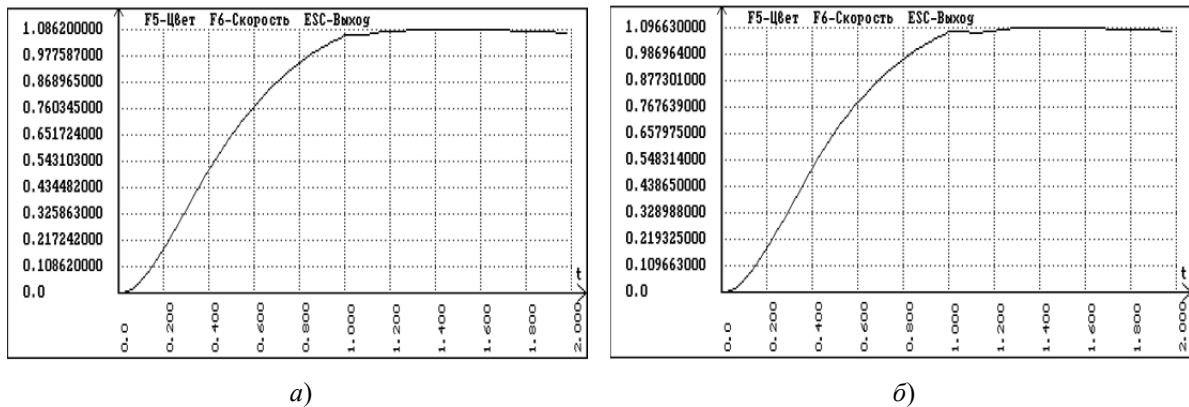


Рис. 6. Переходные процессы в контуре управления в ИИУС КК с идентификатором состояния: а – при безинерционном датчике положения; б – при инерционном датчике положения

Видно, что контур обрабатывает перемещения без перерегулирования и практически без колебаний.

Рассмотрим поведение контура при контурном управлении и набросе нагрузки (например, ветровой).

Результаты моделирования при контурном управлении, т.е. при $U_{зпi} = 1,7t$ и $F_c = 10(t - 1)$, представлены на рис. 7.

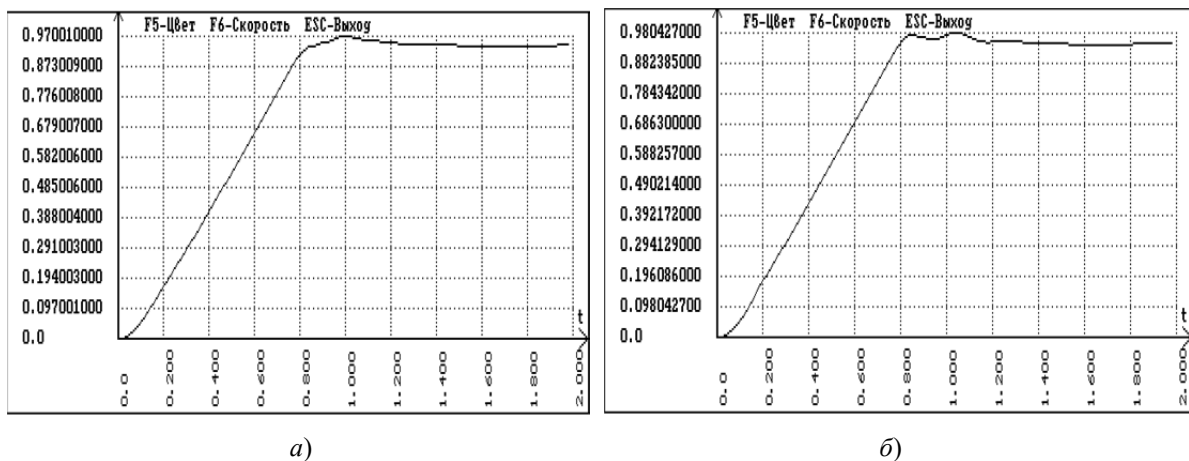


Рис. 7. Переходные процессы в контуре управления в ИИУС КК с идентификатором состояния: а – при безинерционном датчике; б – при инерционном датчике

Анализ графиков на рис. 4–7 показывает, что синтезированная система управления координатой X ИИУС КК с идентификатором состояния при использовании датчиков инерционных и безинерционных обладает хорошими регулировочными характеристиками – практическим отсутствием перерегулирования и малой колебательностью. Приведенные переходные процессы свидетельствуют о хороших технических характеристиках контура управления по координате X ИИУС КК с идентификатором состояния при использовании инерционных датчиков.

Заключение

В статье изложен синтез контура управления одной из координат информационно-измерительной и управляющей системы с идентификатором состояния квадрокоптера, способного мониторить различные объекты и преодолевать возмущения в неопределенных ситуациях.

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

- контуры управления координатами горизонтальной плоскости следует настраивать на технический оптимум, что обеспечивает получение плавных переходных процессов;
- система управления координатой X ИИУС КК без идентификатора состояния обладает большим перерегулированием и высокой колебательностью при использовании инерционных датчиков;
- система управления координатой X ИИУС КК с идентификатором состояния позволяет устранить недостатки и обеспечить необходимые характеристики при использовании инерционных датчиков.

Список литературы

1. Слепцов В. В., Лагунова А. Д., Аблаева А. Е., Динь Ба Фыонг. Разработка и анализ информационно-измерительных и управляющих систем квадрокоптеров // Приборы. 2021. № 9. С. 20–27.
2. Dinh Ba Phuong. Synthesis of the control loop for the coordinate of the horizontal plane of the quadcopter information-measuring and control system // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. 2021. P. 012038. doi:10.1088/1757-899X/1155/1/012038
3. 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. С. 38–43.
4. 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. Т. 4, № 4. С. 13–23.
5. Подрезов Ю. В. Особенности применения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга чрезвычайных лесопожарных ситуаций // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2019. № 3. С. 64–72.
6. Джунипер А. Дроны: критерии выбора + основы управления = безопасность: полное практическое руководство : пер. с англ. В. Яценкова. М. : КоЛибри, 2019. 159 с.
7. Гололобов В. Н., Ульянов В. И. Беспилотники для любознательных. СПб. : НиТ, 2018. 249 с.
8. Ющенко А. С., Лебедев К. Р., Забихафар С. Х. Система управления КК на основе адаптивной нейронной сети // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2017. № 7. С. 262–267.
9. Luukkonen T. Modelling and Control of Quadcopter. School of Science. Espoo, 2011. P. 26.

References

1. Sleptsov V.V., Lagunova A.D., Ablaeva A.E., Din' Ba Fyong. Development and analysis of information-measuring and control systems of quadcopters. *Pribory = Instruments*. 2021;(9):20–27. (In Russ.)
2. Dinh Ba Phuong. Synthesis of the control loop for the coordinate of the horizontal plane of the quadcopter information-measuring and control system. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021:012038. doi:10.1088/1757-899X/1155/1/012038
3. Rokachevskiy O.A., Sleptsov V.V., Ablaeva A.E., Din' Ba Fyong. Synthesis of the control contour of the altitude coordinate of the information-measuring and control system of the quadcopter. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2021;(1):38–43. (In Russ.)
4. Bondarev A.N., Kirichek R.V. Overview of general-purpose unmanned aerial vehicles and regulation of UAV air traffic in different countries. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii = Information technologies and telecommunications*. 2016;4(4):13–23. (In Russ.)
5. Podrezov Yu.V. Features of the use of unmanned aerial vehicles for monitoring emergency forest fire situations. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy = Problems of safety and emergency situations*. 2019;(3):64–72. (In Russ.)
6. Dzhuniper A. *Drony: kriterii vybora + osnovy upravleniya = bezopasnost': polnoe prakticheskoe rukovodstvo: per. s angl. V. Yatsenkova = Unmanned aerial vehicles: selection criteria + fundamentals of management = safety: a complete practical guide: translated from English by V. Yatsenkov*. Moscow: KoLibri, 2019:159. (In Russ.)

7. Gololobov V.N., Ul'yanov V.I. *Bespilotniki dlya lyuboznatel'nykh = Drones for the curious*. Saint Petersburg: NiT, 2018:249.
8. Yushchenko A.S., Lebedev K.R., Zabikhafar S.Kh. The control system of KK based on an adaptive neural network. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N. E. Baumana = Science and education. Bauman Moscow State Technical University*. 2017;(7):262–267. (In Russ.)
9. Luukkonen T. *Modelling and Control of Quadcopter*. School of Science. Espoo, 2011:26.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Владимирович Слепцов
доктор технических наук, профессор,
МИРЭА – Российский
технологический университет
(Россия, г. Москва, ул. Стромьнка, 20)
E-mail: vsleptsov@gmail.com

Vladimir V. Sleptsov
Doctor of technical sciences, professor,
MIREA – Russian technological university
(20 Stromynka street, Moscow, Russia)

Анна Евгеньевна Аблаева
старший преподаватель,
МИРЭА – Российский
технологический университет
(Россия, г. Москва, ул. Стромьнка, 20)
E-mail: ablaeva@gmail.com

Anna E. Ablaeva
Senior lecturer,
MIREA – Russian technological university
(20 Stromynka street, Moscow, Russia)

Динь Ба Фьонг
аспирант,
МИРЭА – Российский
технологический университет
(Россия, г. Москва, ул. Стромьнка, 20)
E-mail: nhoht_ck49@yahoo.com

Dinh Ba Phuong
Postgraduate student,
MIREA – Russian technological university
(20 Stromynka street, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 23.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 20.01.2022

Принята к публикации/Accepted 27.02.2022