

Проектирование квадрокоптера для осмотра помещений и синтез системы управления по его САД-модели

И.С. Фомашин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Аннотация: Рассматривается задача проектирование прототипа БПЛА и синтеза по его САД-модели системы управления в рамках проекта по осмотру строительных объектов. Особое внимание уделено построению компьютерной модели квадрокоптера. На основе существующих методов выполнен энергетический расчет и предложен порядок синтеза регуляторов в контурах управления ориентацией и положение с учетом периода дискретизации используемых датчиков. Полученные путем моделирования результаты подтверждают предложенный алгоритм настройки регуляторов. Решение может быть использовано студентами и специалистами в построении автономных БПЛА или их компьютерных моделей.

Ключевые слова: квадрокоптер, компьютерное моделирование, синтез ПД-регулятора, конструирование БПЛА, стереокамера, осмотр помещений.

Введение

Прогресс в проектировании и навигации легких автономных БПЛА привел к экономической эффективности их внедрения в сферу строительства [1, 2]. В рамках разработки автономной системы осмотра и измерения площади помещений, состоящей из квадрокоптера с системой технического зрения, возникла задача построения САД-модели БПЛА и синтеза по ней системы управления. Тема широко раскрыта с точки зрения получения математической [3] или компьютерной [4] модели квадрокоптера. Методы синтеза систем управления представлены в работах [5, 6]. Предлагаемый в статье подход отличается описанием этапов прототипирования, моделирования и упрощенного синтеза системы управления.

В рамках статьи описаны: подход к выбору компонентов БПЛА, получение массо-центровочных характеристик (МЦХ), построение компьютерной модели и синтез системы управления. Среди специальных требований выделим: максимальную ошибку позиционирования в горизонтальной плоскости не более 0,1 м, максимальный угол крена и тангаже не более 5°, частоту работы системы технического зрения 10 Гц.

Конструирование

Основным ограничением при конструировании является размер дрона. В нашем случае габариты БПЛА должны быть меньше стандартного дверного проема (0,6-0,8 м). Предложим следующий порядок расчета:

- 1) Определение конструкции рамы и размера пропеллеров;
- 2) Расчет ориентировочный вес дрона;
- 3) Подбор двигателя;
- 4) Повторный расчет, уточнение двигателя и аккумулятора.

Из требований по размерам выбрана 5-ти дюймовая X-образная составная рама, отличающаяся доступностью, открытостью и возможностью модификации. Для пропеллеров при равной тяге [7]: уменьшение диаметра увеличивает требуемую мощность; увеличение шага ухудшает устойчивость дрона. Исходя из этого, выбран двухлопастной пропеллер 5030.

Для аэрофотосъемки двигатели должны обеспечивать тягу в 2-3 раза большую, чем вес дрона [7]. Примем двукратный запас по тяге. Ориентировочная полетная масса дрона составила 600 г, из которых около 150 г соответствуют полезной нагрузке: стереокамере, бортовому компьютеру и креплениям для них. Используя доступный калькулятор [8] (или аналитические выражения [9]) для расчета энергетических характеристик БПЛА, выбран двигатель X2207S-2100KV по приемлемым показателям времени полета и току, а также с учётом потребляемого электронными компонентами тока (в нашем случае 3,5 А).

После подбора и разработки необходимых компонентов получен итоговый полетный вес дрона без АКБ. Повторные расчеты возможны для уточнения емкости и массы аккумулятора.

При компоновке обеспечен обзор стереокамере, центр масс смещен в геометрический центр (пересечение лучей) для улучшения устойчивости. Получена модель в отечественной программной среде КОМПАС-3D (Рис. 1).

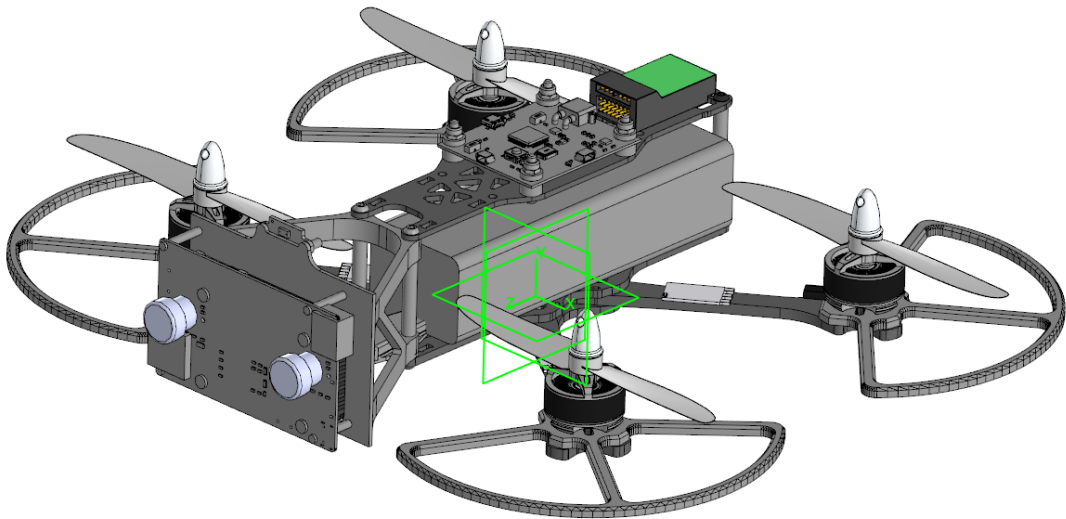


Рис. 1. – 3D-модель БПЛА

При составлении модели учитывались массы и плотности компонентов, что позволило получить **массо-центровочные характеристики** (далее МЦХ) дрона (Таблица № 1).

Таблица № 1

Массо-центровочные характеристики БПЛА

Масса, кг	0.980
X_C , м	0
Y_C , м	0,02
Z_C , м	0
J_X , кг·м ²	0.005459
J_Y , кг·м ²	0.006905
J_Z , кг·м ²	0.002740
J_{XY} , кг·м ²	0.000006
J_{XZ} , кг·м ²	-0.000007
J_{YZ} , кг·м ²	0.000154

Компьютерная модель

Используем программную среду Simscape Multibody для моделирования динамики дрона, применив найденные МЦХ и САД-модель. В первую очередь, определена зависимости тяги и момента пропеллера от его оборотов. Используя эмпирические данные (Таблица № 2), рассчитаны коэффициенты тяги и мощность, учитывая следующие зависимости [3]:

$$k_t = \frac{T}{\rho D^4 n^2},$$

$$k_p = \frac{Q}{\rho D^5 n^2} \cdot 2\pi,$$

$$P = 2\pi n Q,$$

где k_t – коэффициент тяги; k_p – коэффициент мощности; T – тяга пропеллера; Q – крутящий момент пропеллера; D – диаметр пропеллера; n – скорость вращения; ρ – плотность воздуха (1,225 кг/м³); P – механическая мощность.

Таблица № 2

Данные о пропеллере 5030 Gemfan

n , об/мин	T , г	P , Вт	k_t	k_p
10000	89	7.5	0,0986	0,0400
14000	174	20.7	0,0984	0,0403
16000	228	30.8	0,0987	0,0401
20000	356	60.2	0,0986	0,0402

В целях упрощения моделирования, принято усредненное значение коэффициентов $k_t = 0.9855$ и $k_p = 0.0402$ для всех скоростей (Рис. 2).

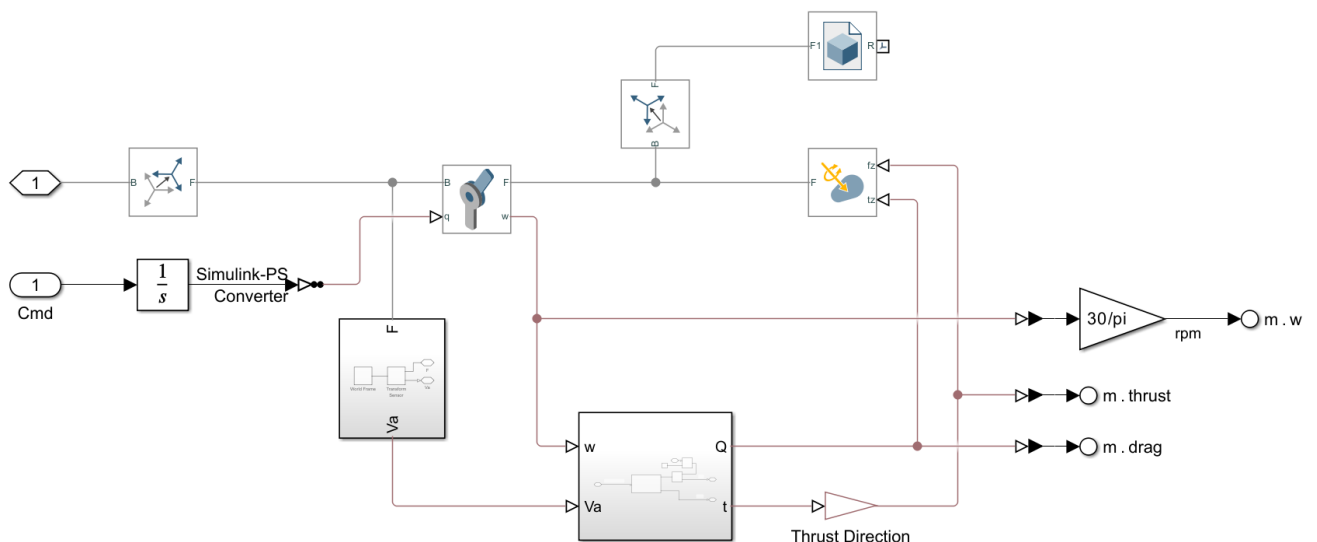


Рис. 2. – Моделирование отдельного пропеллера

Общая схема состоит из блоков расчета траектории, системы стабилизации и объекта управления (Рис. 3).

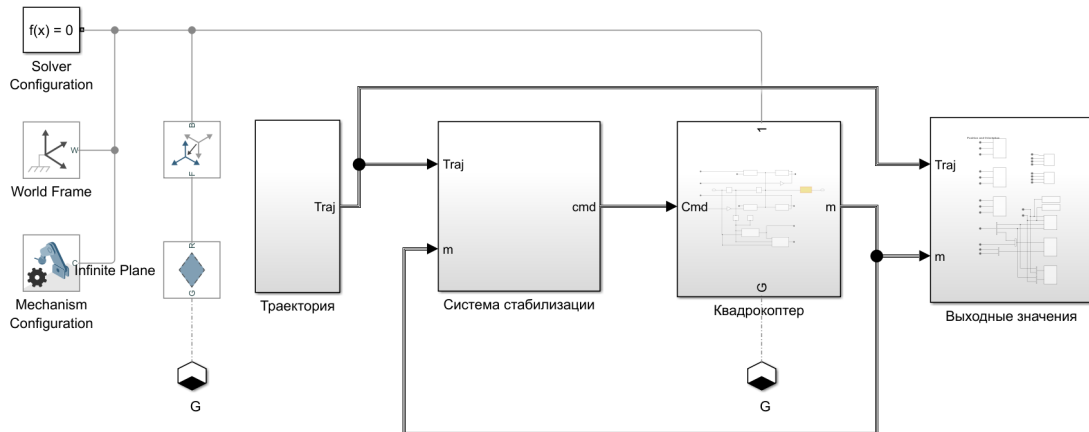


Рис. 3. – Схема в Simscape Multibody

Корпус квадрокоптера связан с винтомоторной группой и инерциальным датчиком (Рис. 4).

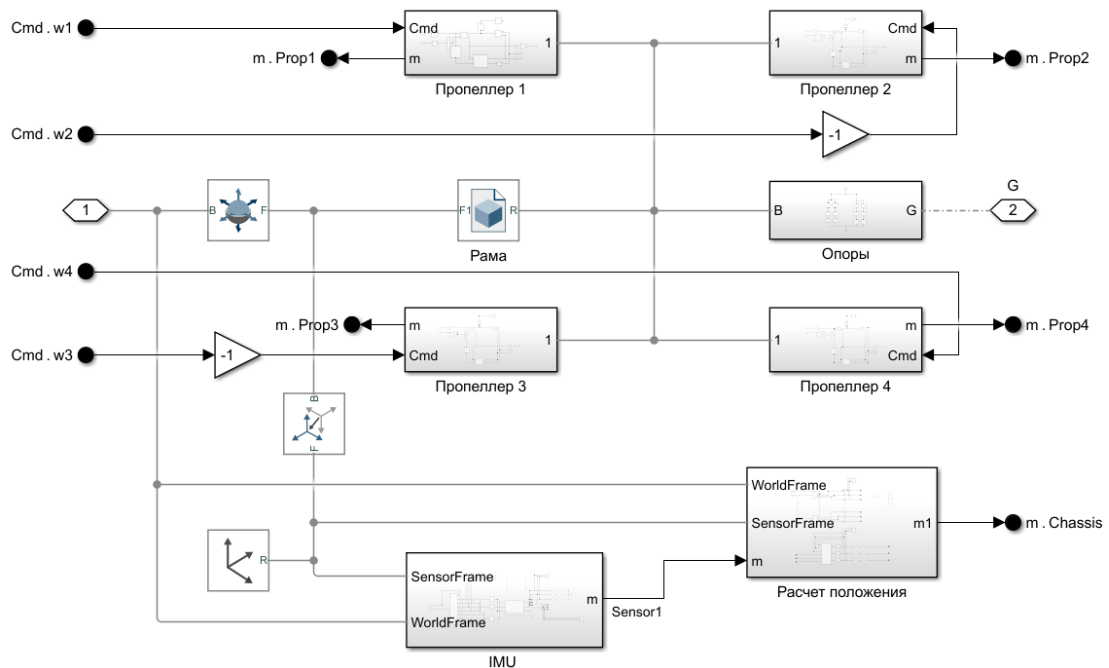


Рис. 4. – Модель квадрокоптера

Используемая в полетном контроллере микросхема MPU6500 позволяет получить значение углов ориентации БПЛА с периодом равным 5 мс. Координаты в плоскости получим через контур внешней обратной связи,

замкнутый системой технического зрения. Текущую высоту получим посредством дальномера VL53L0X с типовым временем измерения 30 мс.

Необходимо настроить (Рис. 5):

- 3 ПД-регулятора по ориентации;
- регулятор по высоте;
- регулятор по положению в горизонтальной плоскости.

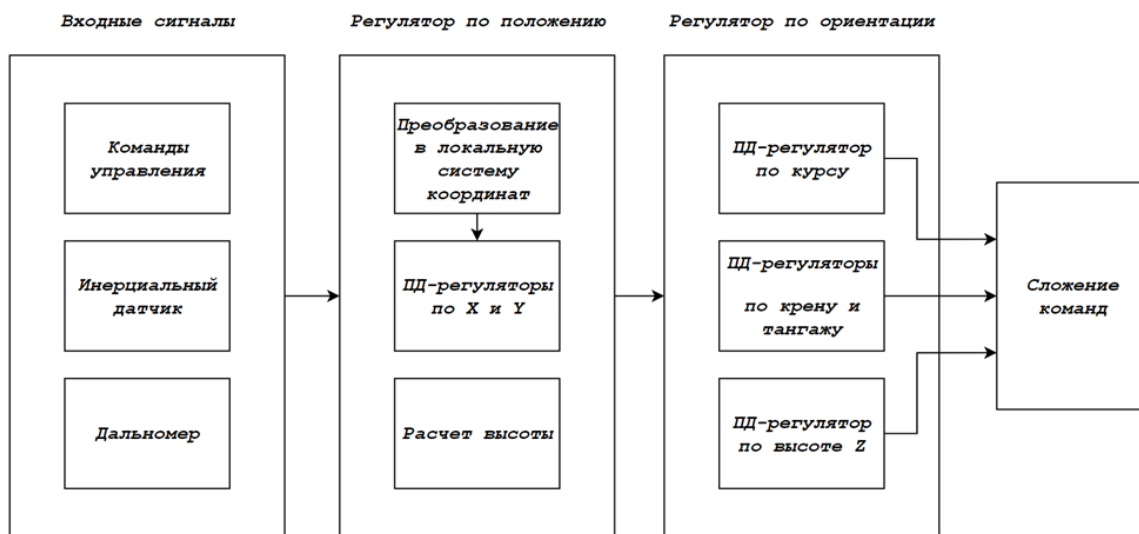


Рис. 5. – Подсистема управления БПЛА

В подсистеме управлении положением (Рис. 6) важно учесть преобразование управляющих сигналов по положению $r = [x, y, z]$ с учетом текущей ориентации БПЛА в связанную с дроном систему координат r_{CB} [3].

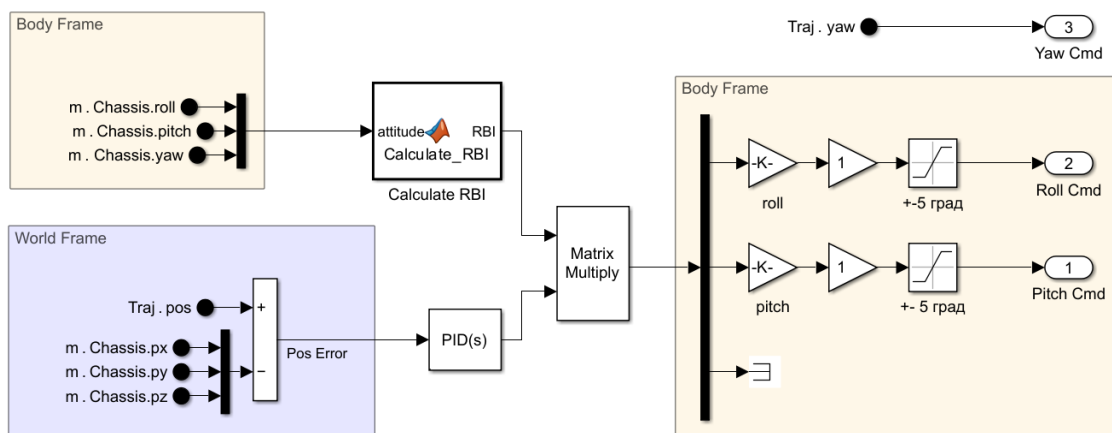


Рис. 6. – Регулятор положения

В нашем случае при нормальной оси OZ , продольной оси OY и поперечной оси OX получим:

$$r_{c\beta} = Rr ,$$
$$R = \begin{pmatrix} c(\varphi)c(\gamma) - s(\varphi)s(\beta)s(\gamma) & -c(\beta)s(\varphi) & c(\varphi)s(\gamma) + c(\gamma)s(\varphi)s(\beta) \\ c(\gamma)s(\varphi) + c(\varphi)s(\beta)s(\gamma) & c(\varphi)c(\beta) & s(\varphi)s(\gamma) - c(\varphi)c(\gamma)s(\beta) \\ -c(\beta)s(\gamma) & s(\beta) & c(\beta)c(\gamma) \end{pmatrix},$$

где φ, β, γ – углы курса, тангажа и крена соответственно; $c(.)$ и $s(.)$ – функции $\cos(.)$ и $\sin(.)$.

Для углов крена и тангажа применим ограничение на входной сигнал не более 5° и коэффициент пропорциональности равный $1/9,81$. Ограничим управляющие сигналы согласно максимальным оборотам двигателей.

Настройка регуляторов

Необходимо исключить перерегулирование, т.е. дрон работает в помещении и производит съемку. В случае линейных непрерывных систем перерегулирование в местной обратной связи не влияет на устойчивость всей системы [10]. Однако построенная модель БПЛА является нелинейной, а также дискретной за счет, в первую очередь, внешней обратной связи с временем дискретизации $0,1$ с. В этой связи перерегулирование в каналах крена и тангажа значительно усложняет настройку внешнего контура вплоть до неустойчивости системы.

Предложим следующий порядок настройки:

- обеспечим устойчивость внутреннего контура (ориентации);
- замкнет систему по положению.

Для получения ориентировочных значений коэффициентов и упрощения расчета выполним коррекцию непрерывной системы без учета дискретизации по времени. Опираясь на работу [5], предложим следующую последовательность настройки каналов управления:

- 1) настроим канал управления высотой;
- 2) настроим каналы управления креном и тангажом;
- 3) настроим канал управления по курсу;
- 4) замкнем систему внешней обратной связью;
- 5) настроим регулятор по положению в плоскости.
- 6) выполним моделирование п.1-5 с учетом дискретизации по времени.

Настройка каждого регулятора состоит из подбора пропорциональной составляющей K_P до появления устойчивых колебаний, и затем взаимное увеличение дифференциальной составляющей K_D и уменьшение пропорциональной до исчезновения перерегулирования [5, 11].

В непрерывной системе замкнем **внутренний контур** ориентации единичными коэффициентами усиления, приняв на вход команду:

$$[\varphi, \beta, \gamma, Z] = [0, 0, 0, 0],$$

где Z – координата дрона по высоте.

При этом получена неустойчивая система. Коррекцию по высоте выполним при ступенчатом управляющей сигнале для оценки перерегулирования и переходного процесса. Затем, настроим регуляторы в каналах крена и тангажа при подаче нулевого управляющего сигнала и при подаче ступенчатого сигнала в 1° , исключив перерегулирование.

Замкнем **внешний контур** единичными коэффициентами усиления пропорциональной части, приняв на вход команду:

$$[X, Y, Z, \varphi] = [0, 0, 0, 0],$$

где X, Y – координаты квадрокоптера в горизонтальной плоскости. Получим колебания в горизонтальной плоскости. Используем ПД-регулятор и получим ориентировочные значения коэффициентов (Таблица № 3).

Введем дискретизацию по времени в каналах ориентации, высоты и координат на плоскости. Затем повторим последовательность настройки регуляторов (Таблица № 3).

Таблица № 3

Коэффициенты регуляторов

Канал	Непрерывная система		Дискретная система	
	K_P	K_D	K_P	K_D
Высоты	150	95	45	95
Крена	5	18	6	20
Тангажа	12	48	12	48
Курса	48	96	48	96
X	1	1	1.14	1.31
Y	1	1	1.14	1.31

Моделирование: результаты

По переходным процессам (Рис. 7) определим показатели качества (Таблица № 4).

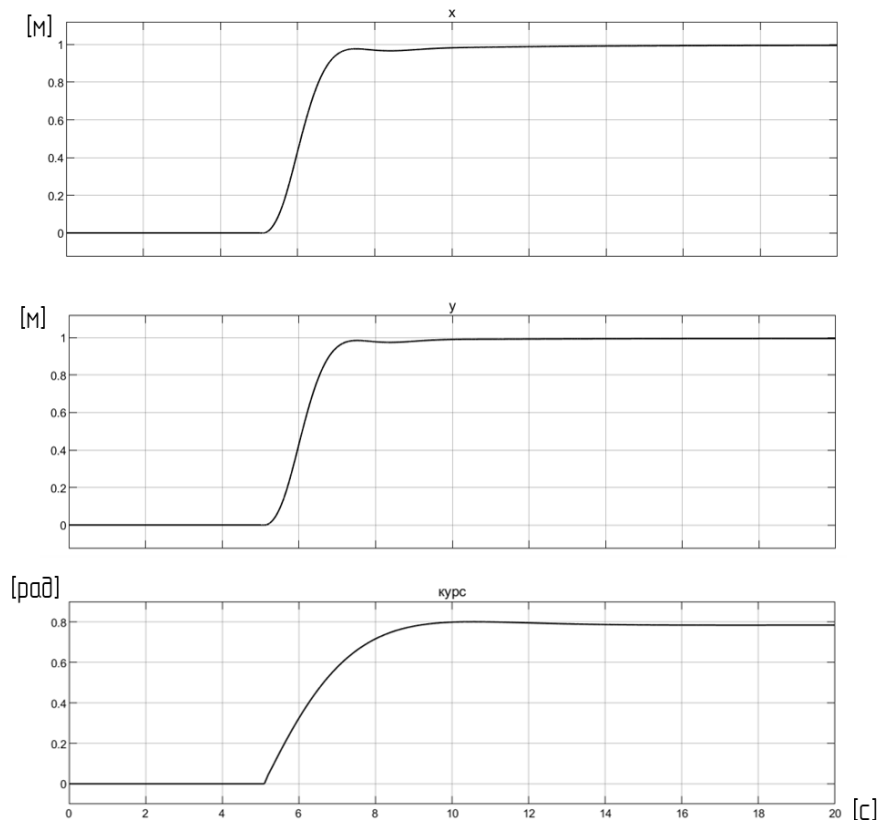


Рис. 7. – Переходные процессы после настройки регуляторов

Таблица № 4

Показатели качества скорректированной системы

Канал	X	Y	φ
Входной ступенчатый сигнал	1 м	1 м	45 °
Время переходного процесса	2 с	2,15 с	3,5 с
Перерегулирование	0	0	1,02%

Для оценки точности при продолжительном полете зададим траекторию в виде окружности [12] радиуса 24 м (длина окружности составит 150 м) с продольное скоростью 0,5 м/с (Рис. 8).

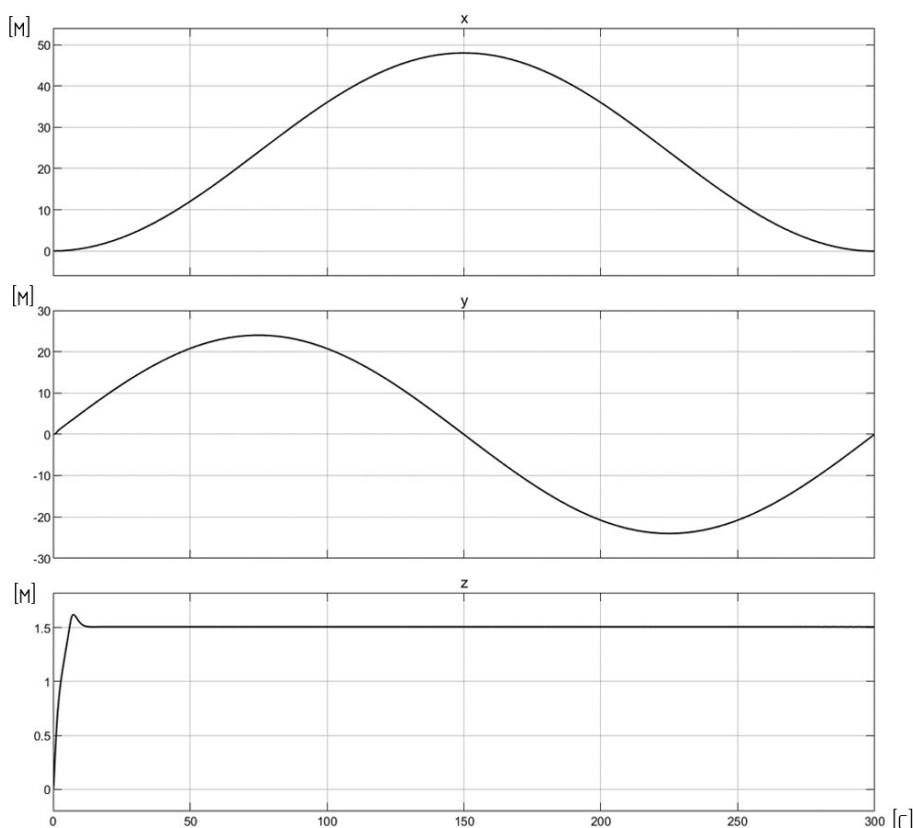


Рис. 8 – Моделирование 5-минутного полета

После переходного процесса: максимальная ошибка позиционирования в горизонтальной плоскости равна 0,0748 м; максимальная ошибка по высоте составила 0,0058 м.

Заключение

В результате выполнения работы описан процесс построения прототипа квадрокоптера и синтеза системы управления на основе его компьютерной модели. Предложена упрощенная последовательность настройки ПД-регуляторов, заключающаяся в настройке сначала внутреннего контура, исключая перерегулирования, и затем настройки внешнего контура по положению. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного метода. Модель может быть дополнена источниками шумов в электронных устройства и влиянием ветра. В дальнейшем планируется использование полученной САД-модели и системы управления для расширенного моделирования автономного движения при работе стереокамеры и алгоритмов навигации. Статья полезна студентам и исследователям в области беспилотных аппаратов для ускоренного создания компьютерного прототипа БПЛА.

Литература

1. Носков И.В., Носков К.И., Тиненская С.В., Ананьев С.А. Дрон-технологии в строительстве – современные решения и возможности // Вестник Евразийской науки. 2020. №5. URL: esj.today/PDF/37SAVN520.pdf.
2. Кавелин А. С., Тютина А. Д., Нуриев В. Э. Использование квадрокоптеров для обследования объектов // Инженерный вестник Дона. 2019. №. 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N7y2019/6108.
3. Лысухо Г. В., Масленников А.Л. Квадрокоптер: динамика и управление // Политехнический молодежный журнал. 2020. № 5(46). С. 1-1.
4. Соловьев П. Р., Савина Л. Ю., Захаркина С. В., Масанов Д. В. Разработка системы управления квадрокоптером в SimMechanics // Инженерный вестник Дона. 2023. №. 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8906.

5. Баранов, О. В. Алгоритм настройки стабилизирующего ПИД-регулятора квадрокоптера // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 10. С. 829-838

6. Белявский А. О., Томашевич С. И. Синтез адаптивной системы управления квадрокоптером методом пассивации // Управление большими системами: сборник трудов. 2016. №. 63. С. 155-181.

7. Писаревский Ю.В., Писаревский А.Ю., Тикунов А.В., Титова Л.Н., Бурковский А.В. Методика определения параметров электродвигателя винтомоторной пары беспилотного квадрокоптера // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 4(61). С. 19-26.

8. xcopterCalc Калькулятор для Мультикоптеров // URL: ecalc.ch/xcoptercalc.php.

9. Махонин А. А., Аль-Духэйдахави М. А. Л., Аль-Карави Р. Д. С. Анализ энергопотребления беспилотного летательного аппарата малых размеров // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2021. №. 3. С. 1-9.

10. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования: монография. 2-е изд., испр. и доп. изд. М.: Наука, 1972. 767 с.

11. Sahrir N. H., Mohd Basri M. A. Modelling and manual tuning PID control of quadcopter. Control, instrumentation and mechatronics: Theory and practice. Singapore : Springer Nature Singapore, 2022. С. 346-357.

12. Baharuddin, A., Mohd Basri, M. A., Trajectory Tracking of a Quadcopter UAV using PID Controller. ELEKTRIKA Journal of Electrical Engineering, 2023. №22(2), pp. 14–21.

References

1. Noskov I. V., Noskov K. I., Tinenskaya S. V., Anan'ev S. A. Vestnik evraziyskoy nauki. 2020. №5 URL: esj.today/PDF/37SAVN520.pdf.



2. Kavelin A. S., Tyutina A. D., Nuriev V. E. Inzhenernyj vestnik Dona 2019. №. 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N7y2019/6108.

3. Lysukho G. V., Maslennikov A.L. Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal. 2020. № 5(46). pp. 1-1.

4. Solov'ev P. R., Savina L. Yu., Zakharkina S. V., Masanov D. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. №. 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8906.

5. Baranov, O. V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie. 2021. № 10. pp. 829-838.

6. Belyavskiy A. O., Tomashevich S. I. Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov. 2016. №. 63. pp. 155-181.

7. Pisarevskiy Yu.V., Pisarevskiy A.Yu., Tikunov A.V., Titova L.N., Burkovskiy A.V. Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы. 2023. № 4(61). pp. 19-26.

8. xcopterCalc Kal'kulyator dlya Mul'tikopterov [Calculator for Multicopters]. URL: ecalc.ch/xcoptercalc.php.

9. Makhonin A. A., Al'-Dukheydakhavi M. A. L., Al'-Karavi R. D. S. Matematicheskoe modelirovanie, komp'yuternyy i naturnyy eksperiment v estestvennykh naukakh. 2021. №. 3. pp. 1-9.

10. Besekerskiy V. A., Popov E. P. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya: monografiya [Theory of automatic control systems: monograph]. Moscow: Nauka, 1972. 767 p.

11. Sahrir N. H., Mohd Basri M. A. Control, instrumentation and mechatronics: Theory and practice. Singapore : Springer Nature Singapore, 2022. pp. 346-357.

12. Baharuddin, A., Mohd Basri, M. A., ELEKTRIKA Journal of Electrical Engineering. 2023. №22 (2), pp. 14–21.

Дата поступления: 14.02.2025 Дата публикации: 27.03.2025
