

Моделирование системы управления полетом квадрокоптера в среде Simulink и Simscape Multibody

Калягин М.Ю.* , Волошин Д.А. , Мазаев А.С.*****

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993, Россия

**e-mail: mukalyagin@yandex.ru*

***e-mail: dmitry_21@mail.ru*

****e-mail: mr8bit@ yandex.ru*

Статья поступила 22.06.2020

Аннотация

В работе приведены результаты моделирования системы управления полетом беспилотного летательного аппарата типа квадрокоптер в среде Simulink/MATLAB.

Разработанная математическая модель квадрокоптера, построенная в САД-системе SolidWorks, экспортирована в Simscape Multibody. На ее основе разработана система управления на основе пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора. Имитационное моделирование системы управления квадрокоптером завершилось экспортом системы управления, разработанной в среде Simulink.

Описанный подход к моделированию системы управления позволяет произвести оценку системы управления квадрокоптером и воспроизвести динамику полета реального физического объекта.

Ключевые слова: квадрокоптер, математическая модель, Simulink, системы управления

Введение

В настоящее время во всем мире беспилотные летательные аппараты (БЛА) широко используются как средства мониторинга, создания карт местности, оптимизации сельскохозяйственной деятельности, контроля пожароопасных зон, наблюдения за состоянием линий электропередач, логистики, и др. [1, 2, 3, 14]. БЛА мультироторного типа получили широкое распространение благодаря конструктивной простоте и возможности совершать полёт как со скоростями близкими к нулю, так и маневрируя с высокой частотой [2, 4, 5, 9].

На ранних этапах проектирования БЛА одной из важнейших задач является исследование динамических характеристик альтернативных проектных вариантов аппаратов с учетом их конструктивных особенностей. Современные инженерные компьютерные системы имеют возможность реализовать сквозной процесс проектирования и увязки твёрдотельных моделей БЛА с адаптивными динамическими моделями и их эксплуатации в различных режимах за счет переноса проектных параметров, полученных в САД-системах, непосредственно в среды моделирования систем управления полетом. Особый интерес представляют собой набор задач, связанных с отработкой алгоритмов управления, обеспечивающих штатное функционирование БЛА при воздействии внешних возмущающих факторов [7, 2, 6].

Цель данной статьи состоит в моделирование сложного объекта управления – квадрокоптера. Существует большое количество работ, посвященных моделированию летательных аппаратов с вертикальным взлетом [9,10,12,13; 16,17], где приводятся различные варианты уравнений движения с различными системами автоматического управления. В работе представлен подход к моделированию системы управления БЛА, выполненного по аэродинамической схеме «квадрокоптер», с использованием CAD-системы SolidWorks и связки Simscape – Simulink [19] для описания физической модели и построения алгоритмов управления квадрокоптером.

Разработка модели квадрокоптера в CAD-системе SolidWorks и трансляция модели в Simscape Multibody

В процессе проектирования и создания твердотельной модели CAD-система SolidWorks позволяет определить параметры конструкции, влияющие непосредственно на динамику аппарата: массу, моменты инерции, положение центра масс, тензор инерций и т.д. На рисунке 1 представлена модель малоразмерного квадрокоптера ZMR250, спроектированная под заданные в техническом задании ограничения, для которой был выполнен экспорт в программный комплекс Simscape/MATLAB Simulation.



Рисунок 1 – Визуализация трехмерной модели квадрокоптера в CAD-системе
SolidWorks

Пакет программного моделирования Simscape входит в состав программного комплекса Simulink/MATLAB и обеспечивает блочное имитационное моделирование сложных динамических систем на основе технологии визуально ориентированного программирования. Simscape Multibody способен взаимодействовать с другими компонентами библиотеки Simulink/MATLAB, увеличивая таким образом возможности моделирования робототехнических систем. Процесс моделирования динамической системы в Simulink/MATLAB может оказаться сложным из-за необходимости определения некоторых параметров: момента инерции и координаты каждого связанного элемента системы и др. Для решения данной проблемы компания MathWorks разработала плагин для экспорта CAD-моделей, который позволяет создавать динамические модели в среде Simscape Multibody на основе трехмерной модели, разработанной в системе автоматизированного проектирования SolidWorks при помощи Simscape Multibody Link.

На рисунке 2 представлена последовательность действий для экспорта CAD-моделей, разработанной в CAD системе SolidWorks[10, 11], в Simscape Multibody /MATLAB.

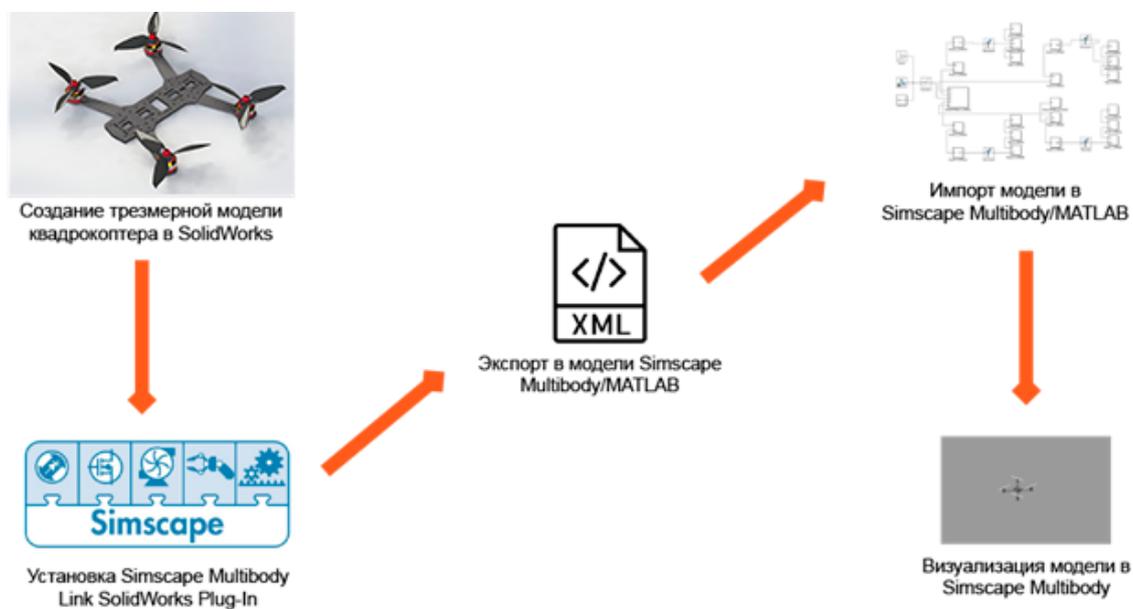


Рисунок 2 – Алгоритм работы плагина CAD экспорта

Экспортированная модель, разработанная в CAD-системе, в среду Simscape Multibody представлена на рисунке 5.

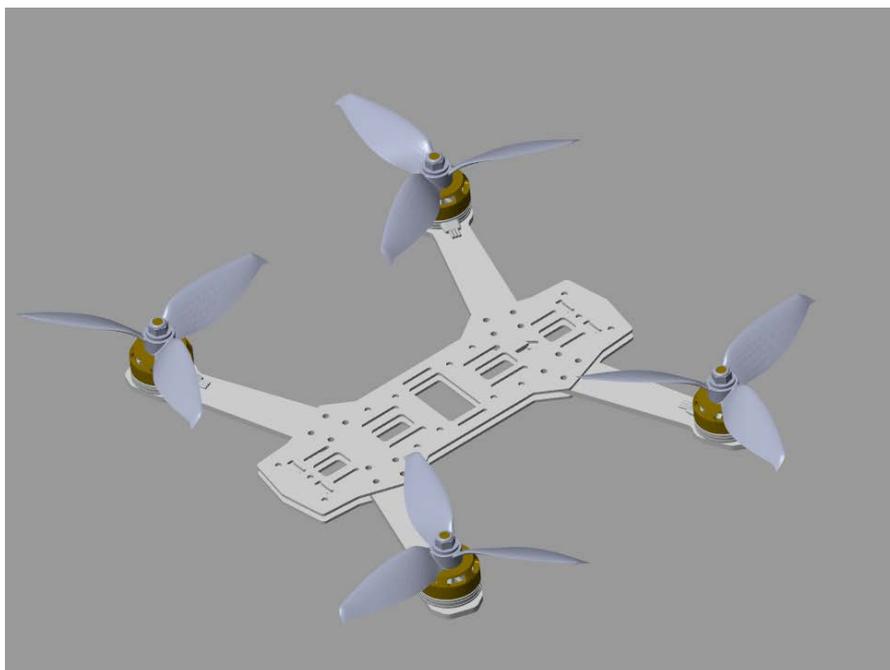


Рисунок 3 – Экспортированная модель в Simscape Multibody

Уравнения движения квадрокоптера

Квадрокоптер представляет собой летательный аппарат с четырьмя винтами. Его винты закреплены на двух пересекающихся, как правило, под прямым углом балках и вращаются попарно в противоположных направлениях, как показано на рисунке 4.

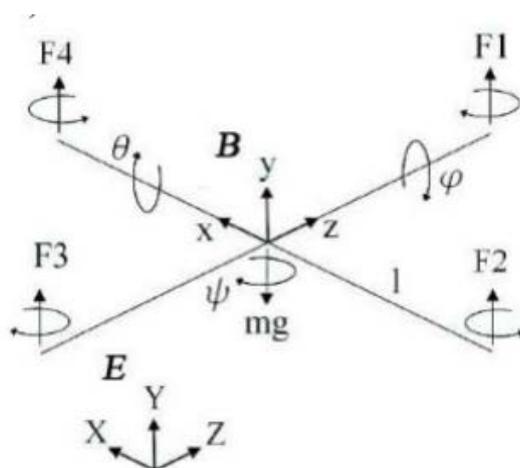


Рисунок 4 – Кинематическая схема квадрокоптера

Если БЛА спроектирован правильно, его центр масс находится в его геометрическом центре. Обозначим оси земной системы координат (E) через X, Y, Z ; а оси связанной системы координат (B) – через x, y, z .

Квадрокоптер имеет шесть степеней свободы. Его движение можно представить как совокупность поступательного движения центра масс и вращательного движения аппарата относительно центра масс [18, 20]. Один из примеров уравнений движения для квадрокоптера представлен в [15]. Жесткостью конструкции аппарата можно пренебречь, тогда уравнения (1)–(3), описывающие движение, выглядят следующим образом:

Для тела массы m справедлив второй закон Ньютона (1):

$$m\vec{a} = -mg\vec{e}_y + R(\varphi, \theta, \psi)\vec{u} \quad (1)$$

где $a = (x, y, z)^T$ – суммарное ускорение динамической системы;

m – масса тела;

\vec{e}_y – единичный вектор, направленный вдоль оси Y;

$R(\varphi, \theta, \psi)$ – матрица поворота;

\vec{u} – сумма неконсервативных сил, действующих на систему (включая силы лобового сопротивления и силу тяги винтов).

Система дифференциальных уравнений (2) для каждой из шести степеней свободы выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{x} = U_1(\cos\psi \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi + \sin\psi \cdot \sin\varphi) \\ m\ddot{y} = U_1(\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \cos\psi \cdot \sin\varphi) \\ mz + mg = U_1(\cos\theta \cdot \cos\varphi) \\ \ddot{\varphi} = \dot{\theta}\dot{\varphi}\left(\frac{I_y + I_z}{I_x}\right) - \frac{J_r}{I_x}\dot{\theta}\omega + \frac{1}{I_x}U_2 \\ \ddot{\theta} = \dot{\varphi}\dot{\psi}\left(\frac{I_z + I_x}{I_y}\right) - \frac{J_r}{I_y}\dot{\theta}\omega + \frac{1}{I_y}U_3 \\ \ddot{\psi} = \dot{\varphi}\dot{\theta}\left(\frac{I_x + I_y}{I_z}\right) - \frac{1}{I_z}U_4 \end{array} \right. \quad (2)$$

где I_x, I_y, I_z – моменты инерции тела относительно осей x, y, z , соответственно,

J_r – момент инерции роторов;

U_i – силы, действующие на динамическую систему.

Уравнения сил, действующих на динамическую систему U_1, U_2, U_3, U_4 и скорости пропеллеров ω , приведены ниже:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 = k(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ U_2 = l(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ U_3 = l(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ U_4 = k(\omega_2^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_3^2) \\ \omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 \end{array} \right. \quad (3)$$

Реализация динамической модели БЛА в Simscape Multibody/MATLAB

Для проверки работоспособности модели разработан алгоритм управления для обеспечения стабилизации углового положения и поддержания заданной высоты полета БЛА типа квадрокоптер.

Модель, описывающая БЛА типа квадрокоптер, построенная в результате экспорта в Simscape Multibody/MATLAB путем использования функции CAD-транслятора, представлена на рисунке 5.

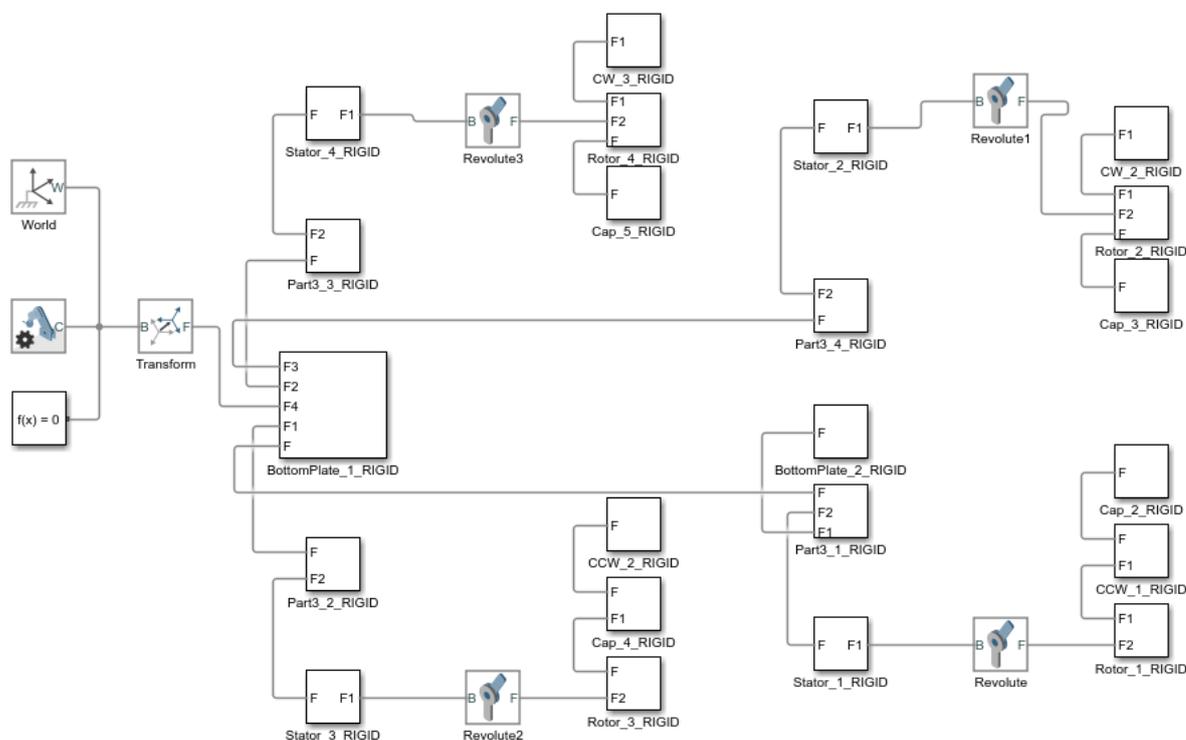


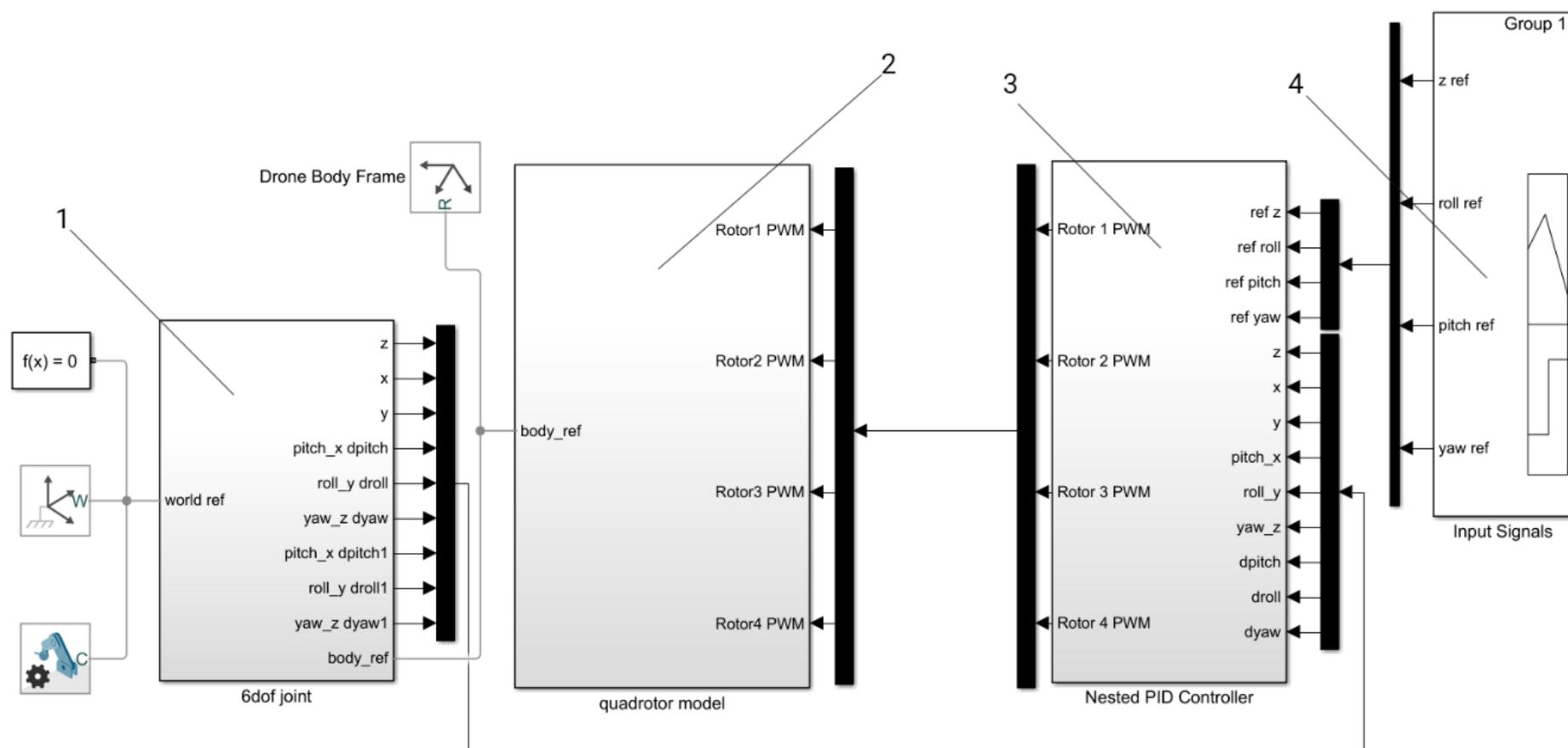
Рисунок 5 – Блочная схема компьютерной модели БЛА типа квадрокоптер

Полученная схема является отображением конструктивной схемы аппарата, спроектированного в SolidWorks. Масса и тензоры инерций для твердых тел, составляющих модель БЛА экспортированные в Simscape Multibody/MATLAB, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства блоков «Body» корпуса квадрокоптера

Элемент	Масса [гр]	Инерция [гр*м ²]
Рама	15	$\begin{pmatrix} 0.80 & 0.59 & 0 \\ -0.59 & 0.80 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Двигатель	4.5	$\begin{pmatrix} 0.00004436 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00001046 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00004436 \end{pmatrix}$
Пропеллер	0.7	$\begin{pmatrix} -0.00906636 & 0 & 0.99995890 \\ 0.99995890 & 0 & 0.00906636 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$

Импортированная модель учитывает связи, влияние которых на конечный результат оказывают малое влияние, а именно винты, гайки и тд, так как расчет их взаимодействия с рамой требует большего времени компиляции модели, модифицированная модель, представлена на рисунке 6.



Обозначения:

1 – подсистема, описывающая поведение квадрокоптера в земной системе координат; 2 – подсистема, описывающая двигательную установку; 3 – система управления квадрокоптера; 4 – система, моделирующая входное воздействие

Рисунок 6 – Модифицированная структурная схема БЛА типа квадрокоптер

Первая подсистема (рисунок 7) предназначена для счисления и отображения положения квадрокоптера в земной системе координат в зависимости от сигналов управления, поступивших на винто-моторную группу аппарата.

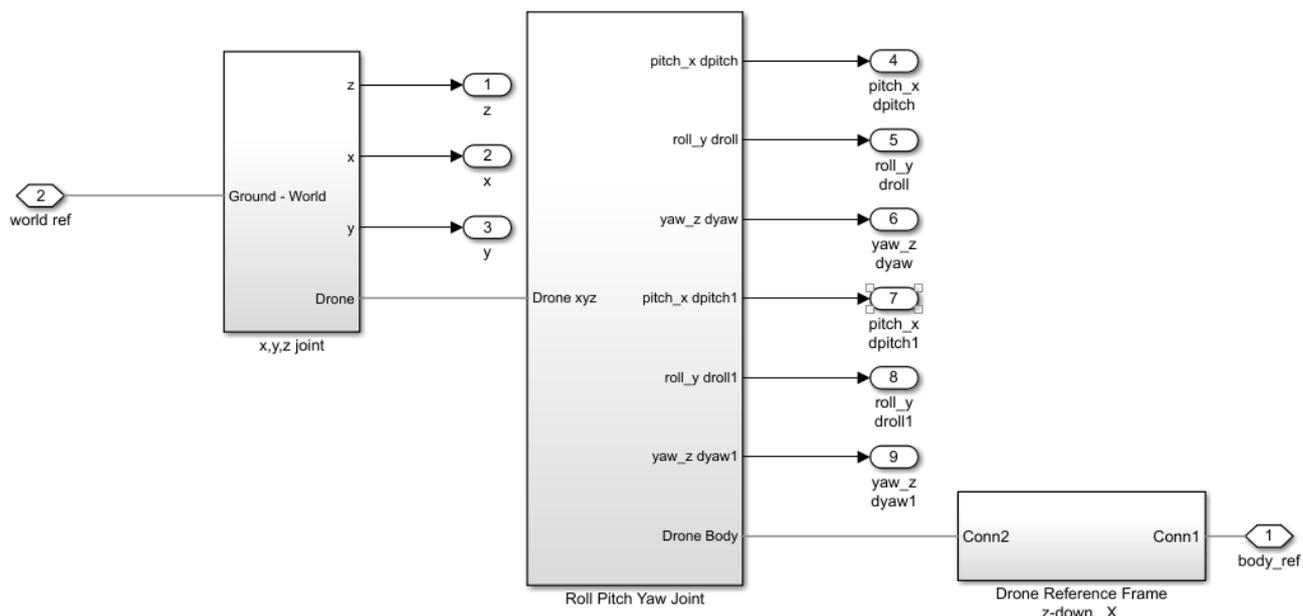


Рисунок 7 – Внутренняя структура подсистемы, описывающей взаимодействие рамы квадрокоптера с земной системой координат

В данной подсистеме выходные значения блока «X, Y, Z joint» – x , y , z представляют собой перемещения по осям x , y и z . Выходные значения блока *Roll Pitch Yaw Joint*:

$pitch_xdpitch$ – угол тангаж,

$roll_ydroll$ – угол крена,

yaw_zdyaw – угол рыскания,

$pitch_xdpitch1$ – угловая скорость тангажа,

$roll_ydroll1$ – угловая скорость крена;

yaw_zdyaw1 – угловая скорость рыскания.

Вторая подсистема моделирует функционирование винтомоторной группы в зависимости от ШИМ (PWM) – сигнала, поступающего на регуляторы оборотов, её структура показана на рисунке 8, на котором использованы обозначения:

подсистема *Body* – основная рама, куда крепятся двигатели квадрокоптера,

подсистема *Rotor* – роторы электро-двигателей двигателей,

блоки *Thrust and Rotation* – блоки преобразования ШИМ сигнала тягу и угловую скорость вращения ротора.

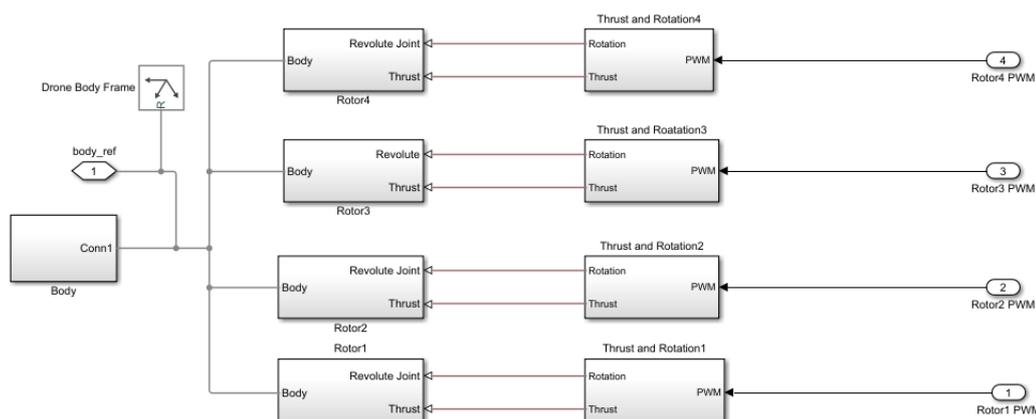


Рисунок 8 – Внутренняя структура подсистемы, описывающей работу винтомоторной группы

Для схемы «квадрокоптер» характерно разнонаправленное вращение винтов, находящихся на одной оси. Для моделирования обратного вращения двигателей необходимо инвертировать сигнал после звена интегратора. Структурная схема управления единственным двигателем при управлении через ШИМ (PWM) представлена на рисунке 9.

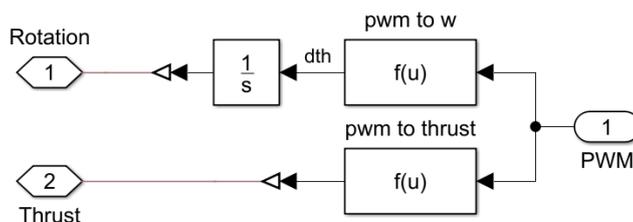


Рисунок 9 – Структурная схема преобразование сигнала ШИМ в количество оборотов и тягу двигателей

Третья подсистема описывает систему управления угловым положением и высотой полета аппарата (рисунок 10).

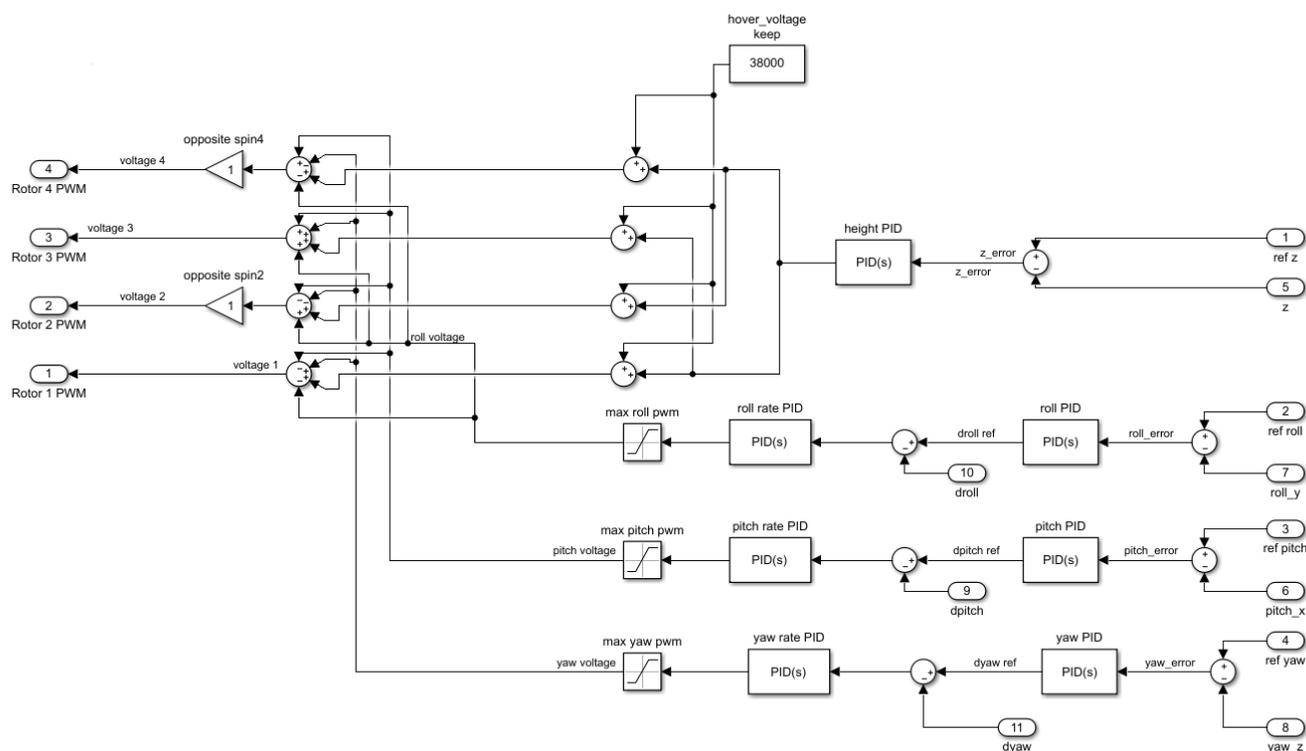


Рисунок 10 – Внутренняя структура подсистемы, описывающей процесс управления

Результаты моделирования

Для валидации цифровой модели системы управления, рассматриваемой в статье, был построен действующий квадрокоптер, на полетный контроллер которого

был интегрирован код, описывающий синтезированную (компьютерную) модель системы управления аппаратом. На рисунках 11–14 представлены графики переходных процессов, полученные при сравнительных испытаниях компьютерной модели и в процессе полёта реального квадрокоптера. Обозначения на рисунках (здесь и далее):

пунктирная линия – требуемое значение,

сплошная линия – переходной процесс.

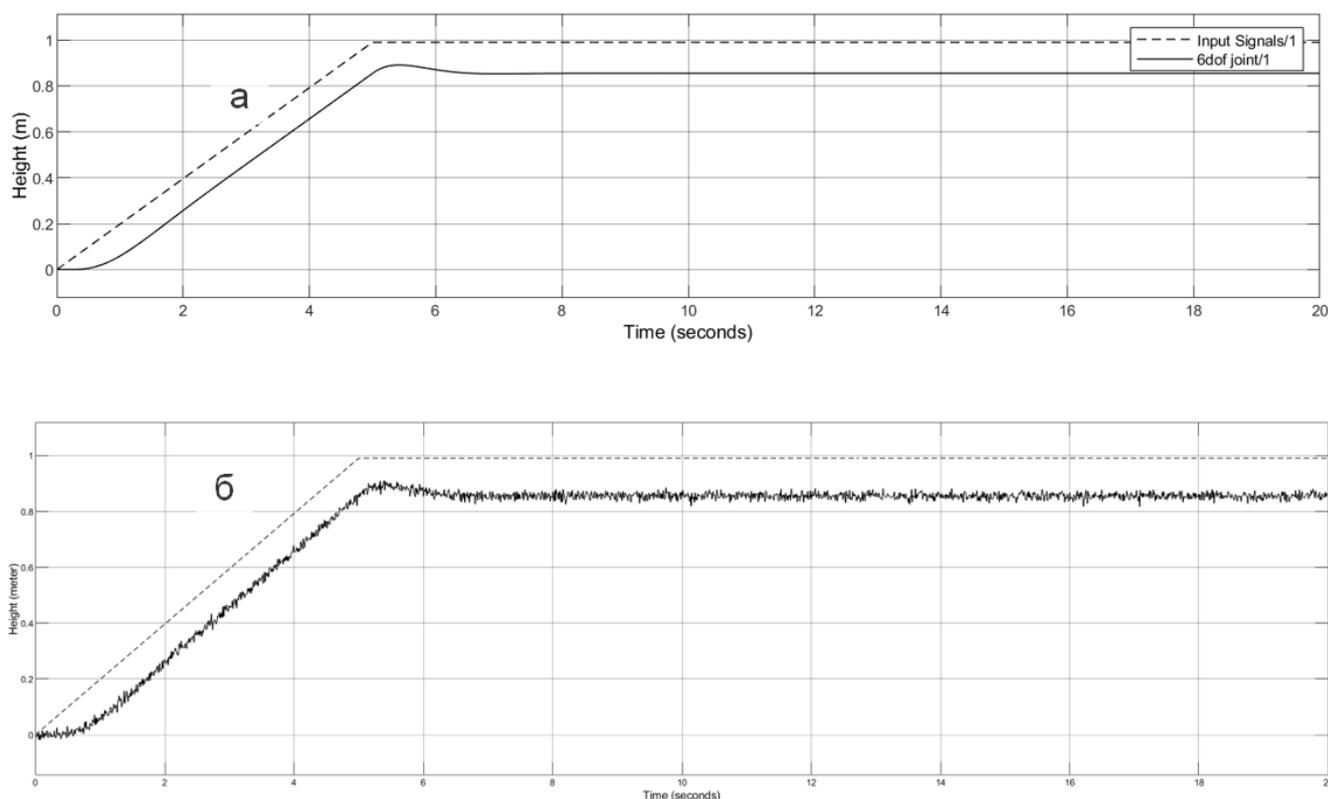


Рисунок 11 – График переходного процесса по высоте полета:

а – результаты моделирования, б – натурные испытания

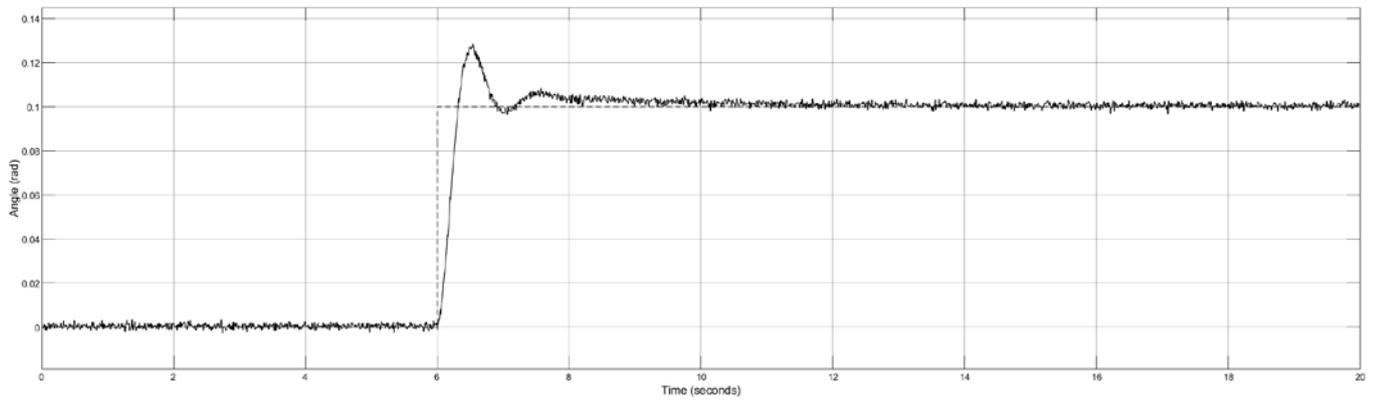
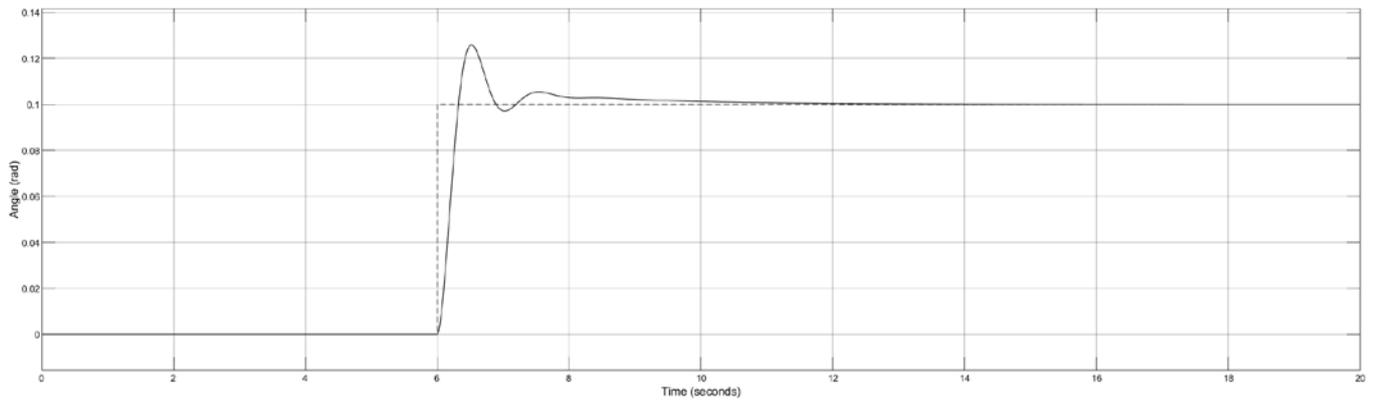


Рисунок 12 – График переходного процесса по углу тангажа – θ :
а – результаты моделирования, б – натурные испытания

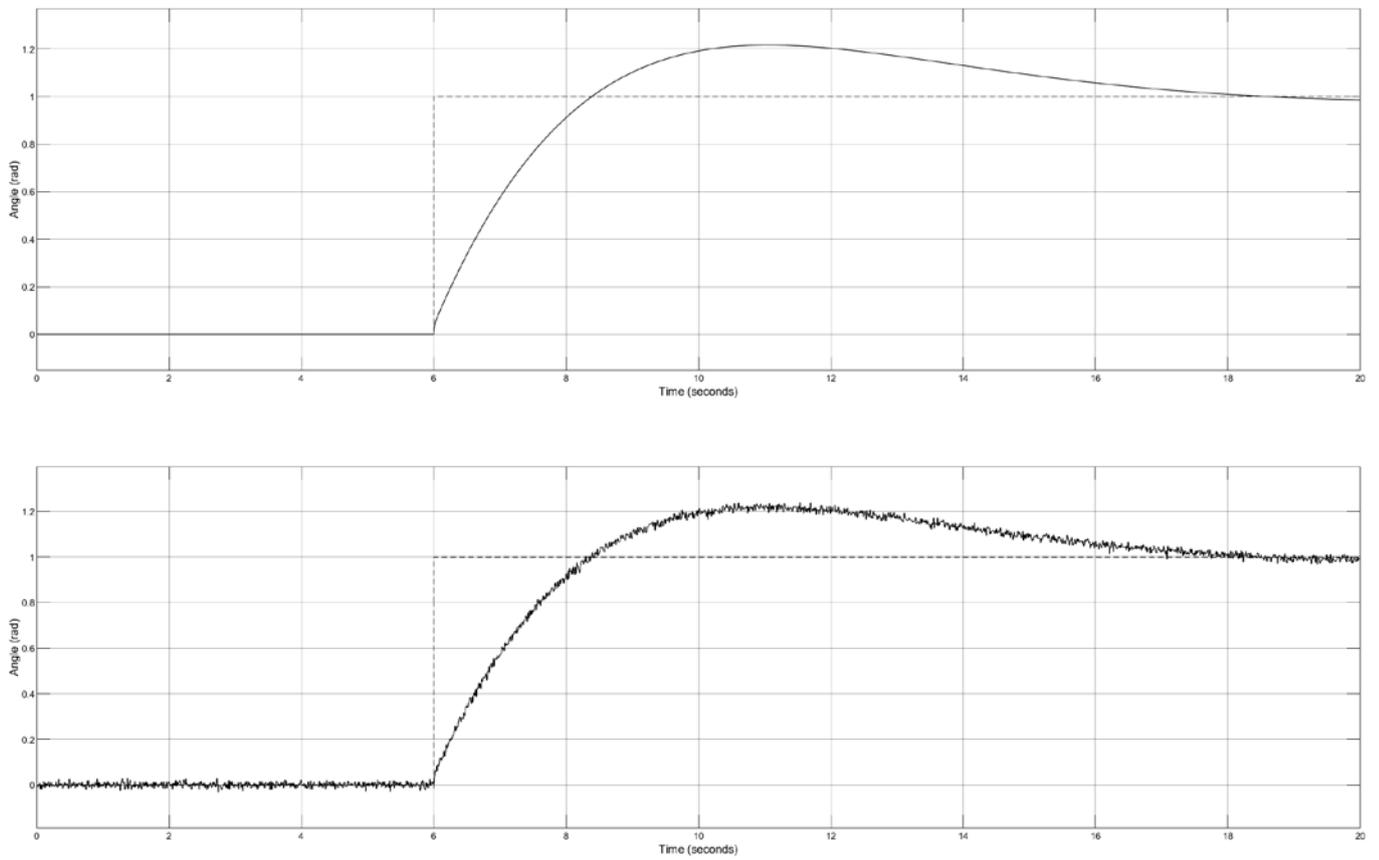


Рисунок 13 – График переходного процесса по углу курса – ψ :

а – результаты моделирования, б – натурные испытания

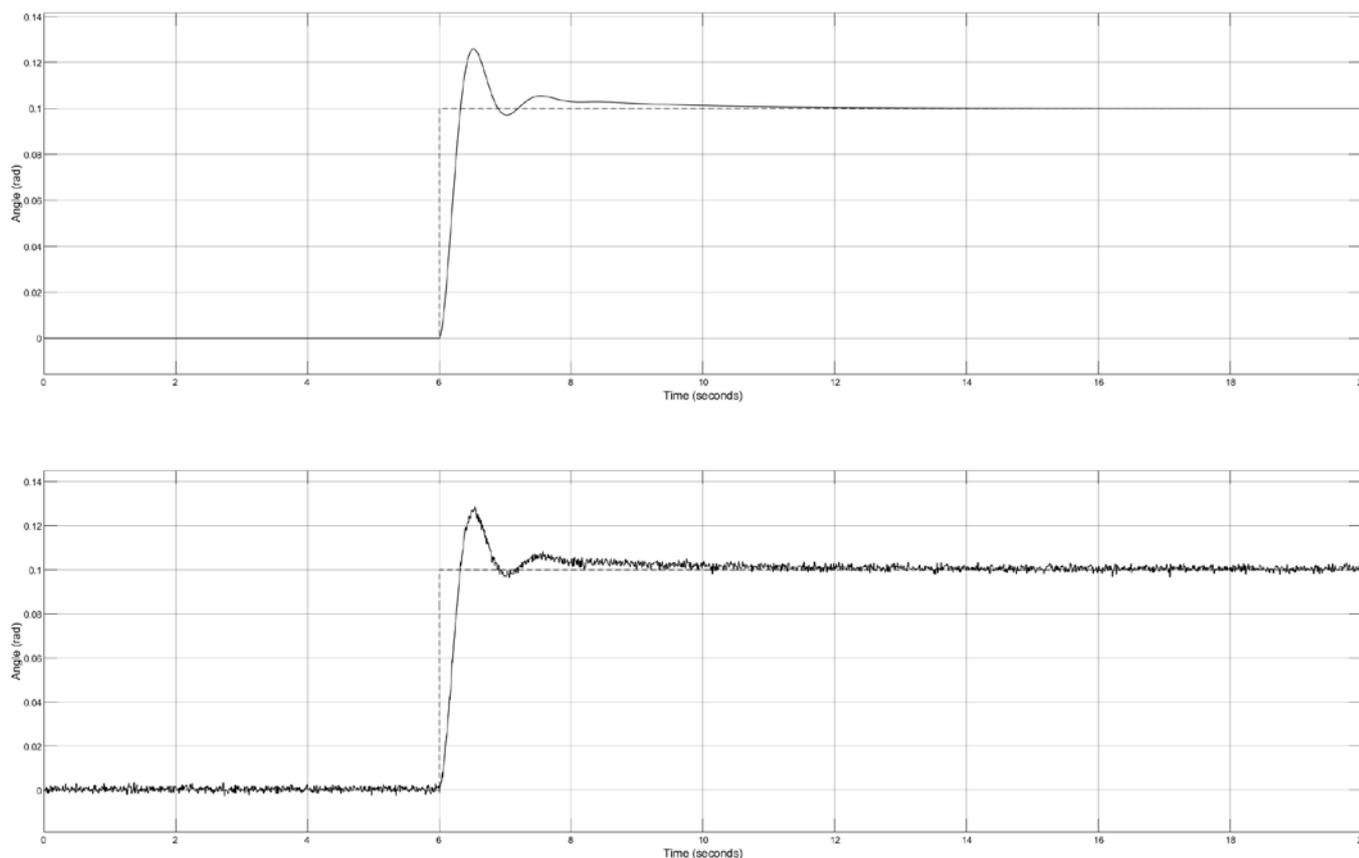


Рисунок 14 – График переходного процесса по углу крена – φ :

а – результаты моделирования, б – натурные испытания

Выводы

В статье предложен подход к увязке твердотельной и динамической компьютерных моделей беспилотного летательного аппарата типа «квадрокоптер» на ранних стадиях проектирования с использованием программных пакетов SolidWorks и Simulink/MATLAB. Спроектированная модель в среде Simulink/MATLAB позволяет проводить оценку разрабатываемых систем стабилизации и систем управления летательным аппаратом для БЛА, выполненного по аэродинамической схеме «квадрокоптер» без запуска самого квадрокоптера.

По сравнению с традиционным подходом моделирования среда SimMechanics обладает рядом преимуществ: простотой построения и параметрированием модели, быстротой отладки, гибкими инструментами измерения и визуализации.

Расхождение результатов компьютерной модели с натурными испытаниями по точности составляет 2.3% для угла тангажа, 2.5% для угла крена, 6.7% для угла рыскания и 3.7% по высоте. Получена высокая точность соответствия моделей, доказывает возможность применения представленного подхода.

Библиографический список

1. Jatsun S. F. et al. Investigation of Oscillations of a Quadcopter Convertiplane in Transient Mode in the Vertical Longitudinal Plane // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”, Springer, Singapore, 2020, pp. 345 – 358. DOI: [10.1007/978-981-13-9267-2_28](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_28)
2. Zulu A., John S. A review of control algorithms for autonomous quadrotors // Open Journal of Applied Sciences, 2014, no. 4, pp. 547 – 556. DOI: [10.4236/ojapps.2014.414053](https://doi.org/10.4236/ojapps.2014.414053)
3. Jatsun S. et al. Control flight of a UAV type tricopter with fuzzy logic controller // XIII International scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", 2017, pp. 1 - 5. DOI: [10.1109/Dynamics.2017.8239459](https://doi.org/10.1109/Dynamics.2017.8239459)
4. Mellinger D., Kumar V. Control and Planning for Vehicles with Uncertainty in Dynamics // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2010, pp. 960 – 965. DOI: [10.1109/ROBOT.2010.5509794](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509794)

5. Tang S., Wüest V., Kumar V. Aggressive Flight with Suspended Payloads Using VisionBased Control // IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, vol. 3, issue 2, pp. 1152 – 1159. DOI: [10.1109/LRA.2018.2793305](https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2793305)
6. Mustapa Z. et al. Altitude controller design for multi-copter UAV // 2014 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT), 2014, pp. 382 – 387. DOI: [10.1109/I4CT.2014.6914210](https://doi.org/10.1109/I4CT.2014.6914210)
7. Калмурзаева Д.К., Багинова В.В. Беспилотные летающие аппараты как инструмент логистики нового поколения. URL: <https://internationalconference.ru/images/PDF/2017/24/bespilotnye-letayushchie-apparaty.pdf>
8. Мусалимов В.М., Заморуев Г.Б., Калапышина И.И., Перечесова А.Д., Нуждин К.А. Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics): учебное пособие для высших учебных заведений. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 114 с.
9. Beji L., Abichou A., Slim R. Stabilization with Motion Planning of a Four Rotor Mini-rotorcraft for Terrain Missions Fourth // Int. Conf. on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), 2004, pp. 335 - 340.
10. Chen Y., Chen R., Su J., Simulation design on the 6-dof parallel vibration platform Based on SimMechanics and Virtual Reality // World Automation Congress (WAC), 2012.
11. Mahony R., Kumar V., Corke P. Multirotor aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor // IEEE Robotics and Automation Magazine, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 20 - 32. DOI: [10.1109/MRA.2012.2206474](https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2206474)
12. Козорез Д.А., Обрезков И.В., Тихонов К.М., Тишков В.В. Разработка комплексной модели решения вертолётной функциональной задачи // Труды МАИ. 2012. № 62. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35567>

13. Тихонов К.М., Тишков В.В. SimMechanicsMatlab как средство моделирования динамики сложных авиационных робототехнических систем // Труды МАИ. 2010. № 41. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=23815>
14. Дивеев А.И., Конырбаев Н.Б. Управление группой квадрокоптеров методом вариационного аналитического программирования // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85774>
15. Огольцов И.И., Рожнин Н.Б., Шеваль В.В. Разработка математической модели пространственного полета квадрокоптера // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62031>
16. Krajník T., Vonásek V., Fišer D., Faigl J. AR-drone as a platform for robotic research and education // International Conference on Research and Education in Robotics, 2011, pp. 172 - 186. DOI: [10.1007/978-3-642-21975-7_16](https://doi.org/10.1007/978-3-642-21975-7_16)
17. Lara D., Romero G., Sanchez A., Lozano R., Guerrero A. Robustness margin for attitude control of a four rotor mini-rotorcraft // Mechatronics, 2010, vol. 20, no. 1, pp. 143 - 152. DOI: [10.1016/j.mechatronics.2009.11.002](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.11.002)
18. Bouabdallah S., Murrieri P., Siegwart R. Design and control of an Indoor micro quadrotor // Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004, vol. 5, no. 5, pp. 4393 – 4398. DOI: [10.1109/ROBOT.2004.1302409](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1302409)
19. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1 + Simulink 5 и MATLAB 7 + Simulink 6 в математике и математическом моделировании. - М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.
20. Bouabdallah S., Clavel R. Siegwart Design and control of quadrotors with application to autonomous flying. Thèse NO 3727, A la faculté des sciences et techniques de l'ingénieur:

Труды МАИ. Выпуск № 112

<http://trudymai.ru/>

Laboratoire de systèmes autonomes 1, Section de microtechnique Lausanne, EPFL, 2007,

155 p.

Quadcopter flight control system simulation in Simulink and Simscape Multibody

Kalyagin M.Yu.*, **Voloshin D.A.****, **Mazaev A.S.*****

*Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia*

**e-mail: mukalyagin@yandex.ru*

***e-mail: dmitry_21@mail.ru*

****e-mail: mr8bit@yandex.ru*

Abstract

Currently, the unmanned aerial vehicles (UAV) are widely used throughout the world as means for monitoring, creating maps, optimizing agricultural activities, monitoring fire being dangerous areas, power lines surveillance, logistics, etc. The multirotor-type UAVs are widely proliferated due to their structural simplicity and the ability to both flying at near zero speeds and maneuvering with high frequency.

One of the most important tasks at the early stages of the UAV design consist in studying dynamic characteristics of alternative design options of the vehicles with account for their design characteristics. The state-of-the-art computer engineering systems are able to implement the end-to-end process of designing and linking solid-state UAV models with adaptive dynamic models and their operation in various modes by transferring design parameters obtained in CAD systems, directly to the simulation environment of the flight control systems. Of particular interest is the set of tasks associated with control algorithms developing to ensure the UAV normal operation under the impact of external disturbances.

The article proposes an approach to the solid-state and dynamic computer models linking of the unmanned aerial vehicle of the “quadcopter” type at the early stages of the

design using Solidworks and Simulink/MATLAB software packages. The model designed in the Simulink/MATLAB environment allows evaluating the developed systems for an aircraft stabilization and control for the UAV, implemented according to the “quadcopter” aerodynamic scheme without starting the quad copter itself.

The discrepancy between the results of the computer model with full-scale tests is 2.3% for the pitch angle, 2.5% for the roll angle, 6.7% for the yaw angle and 3.7% for the height. The obtained high accuracy of the models conformity proves the possibility of applying the method for the automatic control system designing presented in the article.

Keywords: quadcopter, mathematical model, Simulink, control systems.

References

1. Jatsun S. F. et al. Investigation of Oscillations of a Quadcopter Convertiplane in Transient Mode in the Vertical Longitudinal Plane, *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”*, Springer, Singapore, 2020, pp. 345 – 358. DOI: [10.1007/978-981-13-9267-2_28](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_28)
2. Zulu A., John S. A review of control algorithms for autonomous quadrotors, *Open Journal of Applied Sciences*, 2014, no. 4, pp. 547 – 556. DOI: [10.4236/ojapps.2014.414053](https://doi.org/10.4236/ojapps.2014.414053)
3. Jatsun S. et al. Control flight of a UAV type tricopter with fuzzy logic controller, *XIII International scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines"*, 2017, pp. 1 - 5. DOI: [10.1109/Dynamics.2017.8239459](https://doi.org/10.1109/Dynamics.2017.8239459)

4. Mellinger D., Kumar V. Control and Planning for Vehicles with Uncertainty in Dynamics, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2010, pp. 960 – 965. DOI: [10.1109/ROBOT.2010.5509794](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509794)
5. Tang S., Wüest V., Kumar V. Aggressive Flight with Suspended Payloads Using VisionBased Control, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, vol. 3, issue 2, pp. 1152 – 1159. DOI:[10.1109/LRA.2018.2793305](https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2793305)
6. Mustapa Z. et al. Altitude controller design for multi-copter UAV, *2014 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*, 2014, pp. 382 – 387. DOI: [10.1109/I4CT.2014.6914210](https://doi.org/10.1109/I4CT.2014.6914210)
7. Kalmurzaeva D.K., Baginova V.V. *Bespilotnye letayushchie apparaty kak instrument logistiki novogo pokoleniya*. URL: <https://internationalconference.ru/images/PDF/2017/24/bespilotnye-letayushchie-apparaty.pdf>
8. Musalimov V.M., Zamoruev G.B., Kalapyshina I.I., Perechesova A.D., Nuzhdin K.A. *Modelirovanie mekhatronnykh sistem v srede MATLAB (Simulink / SimMechanics): uchebnoe posobie dlya vysshikh uchebnykh zavedenii (Mechatronic systems modeling in MATLAB (Simulink / SimMechanics): a textbook for higher education institutions)*, Saint Petersburg, NIU ITMO, 2013, 114 p.
9. Beji L., Abichou A., Slim R. Stabilization with Motion Planning of a Four Rotor Mini-rotorcraft for Terrain Missions Fourth, *Int. Conf. on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, 2004, pp. 335 - 340.
10. Chen Y., Chen R., Su J., Simulation design on the 6-dof parallel vibration platform Based on SimMechanics and Virtual Reality, *World Automation Congress (WAC)*, 2012.

11. Mahony R., Kumar V., Corke P. Multirotor aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 20 - 32. DOI: [10.1109/MRA.2012.2206474](https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2206474)
12. Kozorez D.A., Obrezkov I.V., Tikhonov K.M., Tishkov V.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 62. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35567>
13. Tikhonov K.M., Tishkov V.V. *Trudy MAI*, 2010, no. 41. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=23815>
14. Diveev A.I., Konyrbaev N.B. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85774>
15. Ogol'tsov I.I., Rozhnin N.B., Sheval' V.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62031>
16. Krajník T., Vonásek V., Fišer D., Faigl J. AR-drone as a platform for robotic research and education, *International Conference on Research and Education in Robotics*, 2011, pp. 172 - 186. DOI: [10.1007/978-3-642-21975-7_16](https://doi.org/10.1007/978-3-642-21975-7_16)
17. Lara D., Romero G., Sanchez A., Lozano R., Guerrero A. Robustness margin for attitude control of a four rotor mini-rotorcraft, *Mechatronics*, 2010, vol. 20, no. 1, pp. 143 - 152. DOI: [10.1016/j.mechatronics.2009.11.002](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.11.002)
18. Bouabdallah S., Murrieri P., Siegwart R. Design and control of an Indoor micro quadrotor, *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004, vol. 5, no. 5, pp. 4393 – 4398. DOI: [10.1109/ROBOT.2004.1302409](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1302409)
19. D'yakonov V.P. *MATLAB 6.5 SP1 + Simulink 5 i MATLAB 7 + Simulink 6 v matematike i matematicheskom modelirovanii* (MATLAB 6.5 SP1 + Simulink 5 and MATLAB 7 +

Simulink 6 in mathematics and mathematical modeling), Moscow, SOLON-Press, 2005, 576 p.

20. Bouabdallah S., Clavel R. *Siegwart Design and control of quadrotors with application to autonomous flying. Thèse NO 3727*, A la faculté des sciences et techniques de l'ingénieur: Laboratoire de systèmes autonomes 1, Section de microtechnique Lausanne, EPFL, 2007, 155 p.