

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТЕНДА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ С МАШУЩИМ КРЫЛОМ

ХОСЕ ЛУИС САРАТЕ МОЙЯ<sup>1</sup>, А. В. МЕШКОВ<sup>2</sup>, А. Е. ЛУКИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Технологический университет Ильменау, 98693, Ильменау, Германия

<sup>2</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: alevlukin@gmail.com

Разработка адаптивной системы для анализа динамики полета в системах с машущим крылом помогает изучить их характеристики и позволяет использовать различные методы управления с целью повышения их эффективности. Представлены результаты разработки стенда для исследования механизма с машущим крылом, основанного на математической модели рычага. Кратко описана аналогичная система. Приведено описание стенда, представлена информация об отдельных элементах конструкции, описана модель Simulink, отвечающая за управление стендом в реальном времени. Результаты показывают, что спроектированный стенд позволяет проводить испытания различных систем управления.

**Ключевые слова:** робототехника, управление, Arduino, механизм с машущим крылом, орнитоптер

Испытательный стенд является устройством для проверки различных инструментов, а также изучения и улучшения новых технологий. Стенды предоставляют необходимые инструменты, такие как сенсоры, для анализа параметров оборудования, испытаний, поиска ошибок и определения возможных стратегий с целью улучшения этих свойств. В дополнение к перечисленному такие комплексы позволяют выделять подсистемы внутри сложной системы и изучать их по отдельности. Это делает подходящими для изучения и проектирования на испытательных стендах сложные системы, например, роботов с машущим крылом, описываемых несколькими аэродинамическими законами и характеристиками потока, такими как число Рейнольдса. Благодаря миниатюризации электронных и электромеханических компонентов (MEMS-акселерометров, моторов и элементов питания) стала возможной разработка различных систем с машущим крылом. Одним из их основных достоинств является эффективность в потоке с высоким числом Рейнольдса. Так, в свободном полете системы с машущим крылом, сравнимые по размерам со своими биологическими прототипами (птицами и насекомыми), превосходят традиционные БЛА с жестким крылом [1]. Механизмы с машущим крылом имеют и другие отличительные свойства, такие как более низкое энергопотребление, высокая маневренность и т.д., каждое из которых может быть исследовано с помощью стенда с целью выработки оптимальной модели управления, улучшающей отдельные параметры [2]. Появление доступных микроконтроллерных плат также упрощает разработку лабораторного оборудования [3].

Однако особенности машущего полета вызывают дополнительные трудности при разработке подобных устройств:

1) вибрации, вызываемые подвижными частями, такими как шатуны, кривошипы и крылья, зашумляют показания акселерометров, что приводит к необходимости использовать фильтры [4];

2) моделирование полета с высоким числом Рейнольдса, т.е. полета, основанного на вызываемых крыльями турбулентных потоках, является сложной задачей, таким образом, требуется получение экспериментальных данных с реальных систем.

Решение этих задач важно для создания рабочей системы управления и обеспечения стабильного полета в трудных условиях, например при ветре, особенно для легкого БЛА.

Целью настоящей статьи является разработка стенда для отработки систем управления механизмом с машущим крылом. Характеристики проектируемого стенда:

- 1) поддержка механизмов с размахом крыла до 36 см, позволяющая примерять различные виды доступных систем;
- 2) масса механизма до 100 г, включая бортовую электронику;
- 3) для изучения поведения механизма при разных углах атаки должна обеспечиваться возможность вращения механизма на  $360^\circ$  вокруг горизонтальной оси;
- 4) возможность отслеживания углового положения для создания замкнутой системы управления;
- 5) связь с ПК с установленным ПО MatLabSimulink для изучения различных систем управления;
- 6) поддержка дополнительных устройств, таких как вольтметры и амперметры.

Было принято решение разработать систему, аналогичную лабораторной установке 3-DOFHelicopter от компании Quanser [5]. Существенное отличие заключается в том, что разработанный механизм имеет только одну степень свободы, кроме того, 3-DOFHelicopter создан для работы с аппаратами, подъемная сила в которых создается с помощью пропеллеров, это делает их поведение практически линейным, в отличие от систем с машущим крылом, в которых присутствует большое количество возмущений, проявляющихся в возникновении предельного цикла [6].

Была проанализирована литература по этой тематике. Работы посвящены разработке графического интерфейса для управления орнитоптерами с целью достижения высокой маневренности [7]. Также в них исследовалась возможность управления летательными аппаратами с помощью специально разработанных алгоритмов управления вместо использования готовых контроллеров [8]. Таким образом, работы посвящены, в первую очередь, вопросам управления, в то время как проекты испытательных стендов почти не представлены.

После определения основных требований к исследовательской платформе началась разработка электронной управляющей платы для обеспечения обратной связи с лабораторным ПК. Было принято решение выполнить плату в виде компактного модуля, удовлетворяющего следующим требованиям:

- 1) беспроводная связь с ПК;
- 2) бортовой источник питания;
- 3) датчик для отслеживания углового положения механизма;
- 4) монитор постоянного тока для отслеживания тока батареи;
- 5) драйвер двигателя для управления частотой маха через ШИМ;
- 6) минимально возможная масса и габариты.

В работе использовались следующие компоненты:

1) микроконтроллерная плата Arduino/GenuinoMKR1000, разработанная для использования в проектах „интернета вещей“, была выбрана благодаря малым массе и габаритам, встроенному модулю Wi-Fi, а также встроенному чипу для зарядки аккумулятора;

2) энкодер. Начальные эксперименты показали, что сопротивление вращению вала резистивного энкодера слишком велико, поэтому для снятия точных показаний значения угла атаки был выбран магнитный энкодер постоянного вращения EMS22A30-C28-MS6, позволяющий снимать до 1024 значений положения;

- 3) монитор тока INA219 DC Current Monitor, изменяемый диапазон  $\pm 3,2$  А;
- 4) акселерометр LSM303DLHC;
- 5) драйвер двигателя Pololu DRV8835 Dual Motor Driver Carrier;
- 6) двигатель CL-0615-14;

7) батарея. Литий-полимерный аккумулятор на 900 мАч используется как основной источник питания. Стандартные коннекторы позволяют легко подключать его к ArduinoMKR1000.

Также в работе используются два подтягивающих резистора на I2C-шине и переключателя для отдельного включения платы и подключения батареи, что позволяет выбирать между внешним и внутренним источником питания.

Таким образом, был спроектирован управляющий модуль, удовлетворяющий всем поставленным требованиям (рис. 1).

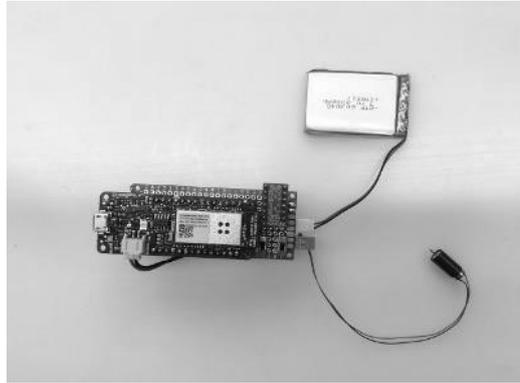


Рис. 1

Простой фильтр был введен для усреднения показаний датчика и уменьшения шума. Была подтверждена работоспособность устройства (как автономная, так и при подключении к ПК). Усредняющий фильтр позволил устранить скачки показаний, задержка, связанная с использованием фильтра, незначительна.

На рис. 2 представлена схема механической части установки. Угол  $\theta$  показывает отклонение механизма от вертикальной оси, возникающее за счет подъемной силы  $F$ , создаваемой машущими движениями,  $l_1$  и  $l_2$  — длины плеч,  $m_1$  и  $m_2$  — массы механизма и противовеса,  $r_1$  и  $r_2$  — координаты механизма и противовеса. Угловое положение отслеживается с помощью акселерометра и магнитного энкодера.

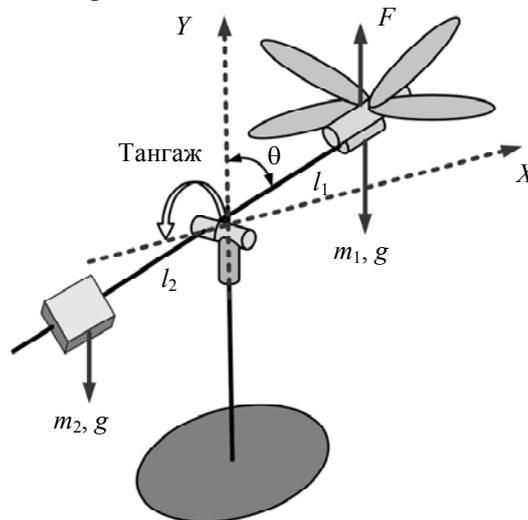


Рис. 2

Динамику системы можно описать следующими уравнениями:

$$\mathbf{r}_1(t) = \begin{bmatrix} l_1(t) \sin(\theta(t)) \\ l_1(t) \cos(\theta(t)) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{r}_2(t) = \begin{bmatrix} -l_2(t) \sin(\theta(t)) \\ -l_2(t) \cos(\theta(t)) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$K = K - U, \quad (4)$$

$$K(\dot{r}(t)) = \frac{1}{2} m_1 \dot{r}_1^T(t) \dot{r}_1(t) + \frac{1}{2} m_2 \dot{r}_2^T(t) \dot{r}_2(t) = \frac{1}{2(m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2) \theta^2(t)}, \quad (5)$$

$$U(r(t)) = m_1 \mathbf{g} r_1(t) + m_2 \mathbf{g} r_2(t) = (m_1 l_1 - m_2 l_2) g \cos(\theta(t)). \quad (6)$$

Представим уравнение Лагранжа для системы

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q, \quad (7)$$

где  $q = \theta(t)$  — обобщенная координата

Передаточная функция системы принимает вид

$$\frac{\theta}{F} = \left( \frac{l_1}{m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2} \right) / \left( S^2 + \left( \frac{\beta l_1}{m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2} \right) S + \frac{g(m_2 l_2^2 + m_1 l_1^2)}{m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2} \right). \quad (8)$$

Первичные испытания показали, что невысокая точность изготовления стенда наряду с нежелательным трением в подшипниках скольжения, значительно ограничивали диапазон возможных углов тангажа (0—180°). В связи с этим было принято решение разработать вторую модель установки. Вместо дерева был использован акриловый пластик, для достижения большей точности детали были изготовлены на станке с ЧПУ. Подшипники скольжения были заменены на подшипники качения. Деревянная крестовина была заменена пластиковой деталью, изготовленной с помощью 3D-принтера.

Управляющая программа [9] была составлена в среде MatLabSimulink, связанной с Arduino с помощью библиотеки ArduinoI/O (рис. 3). Программа в Simulink взаимодействует с портами, отвечающими за снятие показаний с датчика и отправку управляющего сигнала на контроллер двигателя [10]. На этом этапе связь с компьютером осуществлялась через USB. ПИД-контроллер использовался для регулировки положения механизма [11]. Также для устранения нежелательных шумов, вызванных вибрацией рычага вследствие движения крыльев, был введен блок фильтра. Входными данными для системы является заданный угол тангажа, выходными — управляющий сигнал для контроллера двигателя, т.е. подъемная сила.

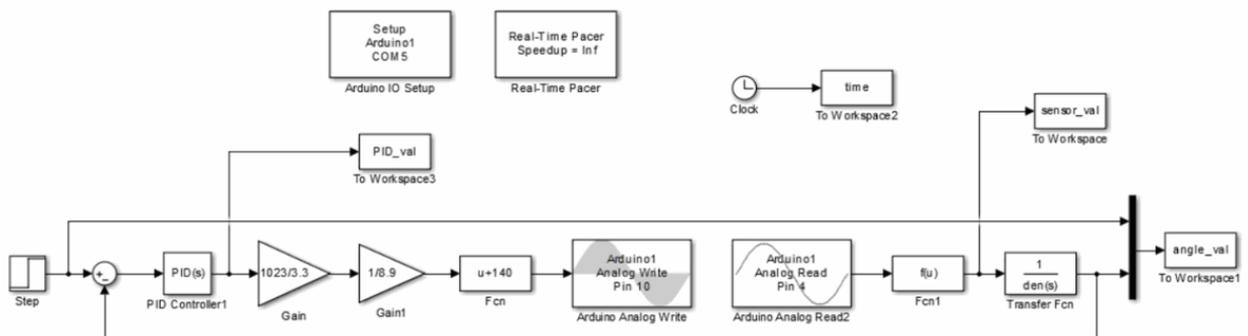


Рис. 3

Результаты испытания стенда представлены на рис. 4 (1 — входное воздействие, 2 — выходные данные). Перед системой была поставлена задача перейти из вертикального положения в горизонтальное в соответствии с сигналом управления и оставаться в этом состоянии. Выходные данные показывают квазистатическое состояние, нарушаемое махами крыльев.

На 150-й секунде было приложено возмущающее воздействие с целью привести механизм в вертикальное положение. Время, затраченное на возвращение в квазистационарное состояние, составило приблизительно 50 с.

Таким образом, график показывает, что на систему негативно влияют шумы, вызванные движением крыльев, одновременно затрудняя снятие данных с датчика и препятствуя быстрому переходу системы в заданное положение вследствие эффекта предельного цикла.

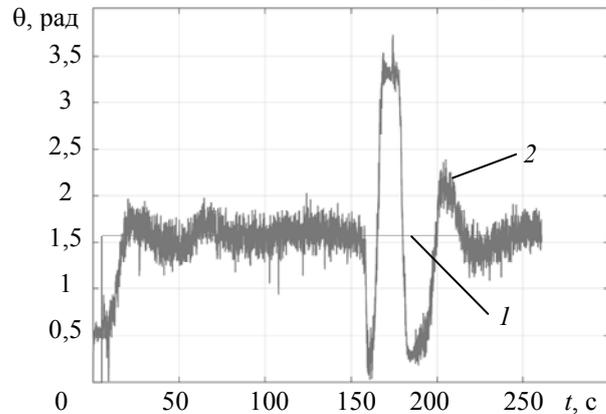


Рис. 4

В ходе работы был спроектирован стенд для изучения свойств механизма с машущим крылом. Система управления была построена в среде Simulink для управления частотой маха крыла механизма через микроконтроллерную плату Arduino. Для регулирования угла тангажа используется ПИД-регулятор. Текущее значение угла отслеживается с помощью акселерометра. График зависимости угла тангажа от времени показывает, что система стабилизируется вокруг заданного положения несмотря на эффект предельного цикла. Испытания показали работоспособность ПИД-регулятора, в том числе при значительных внешних возмущениях. Дальнейшие исследования будут направлены на создание более эффективной системы управления с целью увеличения быстродействия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shyy W. et al. An introduction to flapping wing aerodynamics. Cambridge University Press, 2013. Vol. 37.
2. Flying insects and robots / Ed. by D. Floreano et al. Berlin: Springer, 2010.
3. D'Ausilio A. Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment // Behavior research methods. 2012. Vol. 44, N 2. P. 305—313.
4. Rose C., Fearing R. S. Flight simulation of an ornithopter: Master's thesis. EECS Department, University of California, Berkeley, May 2013 [Электронный ресурс]: <<http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2013/EECS-2013-60.html>>.
5. Lopes R. V. et al. Modelling and constrained predictive control of a 3DOF helicopter // XVI Congresso Brasileiro de Automatica. Salvador, Brazil Duration, 3—6 Oct. 2006. P. 429—434.
6. Pfeiffer A. T. et al. Ornithopter flight simulation based on flexible multi-body dynamics // J. of Bionic Engineering. 2010. Vol. 7, N 1. P. 102—111.
7. Knuppel P. and Winter B. Tdxcopter [Электронный ресурс]: <<https://sites.google.com/site/tdxcopter/home>>.
8. Sankarasrinivasan S. et al. Autonomous control of Flapping Wing Vehicles using graphical user interface // Intern. Conf. on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). IEEE. 2015. P. 2217—2220.
9. Corke P. Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB. Springer, 2011. Vol. 73.
10. Al-Busaidi A. M. Development of an educational environment for online control of a biped robot using MatLab and Arduino // 13th Intern. Workshop on Mechatronics (MECATRONICS) & 7th Europe-Asia Congress on and Research and Education in Mechatronics (REM). 2012. P. 337—344.

11. Ang K. H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transact. on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13, N 4. P. 559—576.

**Сведения об авторах**

- Хосе Луис Зарате Мойя** — докторант; Технологический университет Ильменау, кафедра биомехатроники  
**Алексей Викторович Мешков** — студент; Университет ИТМО; кафедра мехатроники  
**Александр Евгеньевич Лукин** — студент; Университет ИТМО; кафедра мехатроники;  
 E-mail: alevlukin@gmail.com

Поступила в редакцию  
21.11.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Хосе Луис Зарате Мойя, Мешков А. В., Лукин А. Е. Проектирование стенда для управления механизмом с машущим крылом // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 154—159.

**DESIGNING A TEST BENCH FOR A WAVING WING MECHANISM CONTROL**

**Jose Luis Zarate Moya<sup>1</sup>, A. V. Meshkov<sup>2</sup>, A. E. Lukin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Technological University of Ilmenau, 98693, Ilmenau, Germany*

<sup>2</sup>*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*

*E-mail: alevlukin@gmail.com*

The development of an adaptive system for analyzing the properties of flight dynamics in a system with a waving wing helps to study the system characteristics and makes it possible to use various control methods to improve its efficiency. A test bench is developed for study of a mechanism with a waving wing. Results of investigations based on a mathematical model of the lever are presented. Description of the test bench and information on the construction elements are presented. The Simulink model used for control over the test bench in real time is discussed. The designed test bench is reported to allow for testing of various control systems.

**Keywords:** robotics, control, Arduino, mechanism with waving wing, ornithopter

**Data on authors**

- Jose Luis Zarate Moya** — Doctoral Student; Technological University of Ilmenau, Department of Biomechatronics  
**Alexey V. Meshkov** — Student; ITMO University, Department of Mechatronics  
**Alexander E. Lukin** — Student; ITMO University, Department of Mechatronics;  
 E-mail: alevlukin@gmail.com

**For citation:** Jose Luis Zarate Moya, Meshkov A. V., Lukin A. E. Designing a test bench for a waving wing mechanism control. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 2. P. 154—159 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-154-159