

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНО-МОДЕЛИРУЮЩЕГО СТЕНДА
УГЛОВОЙ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЗЕНИТНОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ РАКЕТЫ****И.В. Веденичев**

vedenicheviv@gmail.ru

SPIN-код: 8215-0660

З.Г. Сaitова

saitova.z@mail.ru

SPIN-код: 4612-5123

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Рассмотрено создание и практическое использование комплексно-моделирующего стенда угловой динамики движения зенитной управляемой ракеты. Приведен габаритный чертеж моделирующего стенда. Дано описание устройств, приводящих модель ракеты в движение. Имитация углового движения ракеты осуществляется посредством изменения положения модели ракеты с помощью сервопривода, управляемого платой Arduino UNO. Описано подключение сервопривода к плате. Изменение угла отклонения рулей модели обеспечено с помощью шагового двигателя, управляемого платой Arduino UNO. При построении моделирующего стенда учтены особенности используемых устройств. Осуществлен выбор 3D-принтера, позволяющего изготовить элементы конструкции стенда.

Ключевые слова

Моделирующий стенд, зенитная управляемая ракета, Arduino, MATLAB, Simulink, 3D-принтер, угловая динамика ракеты, система управления

Поступила в редакцию 21.01.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Одним из основополагающих принципов успешного освоения изучаемого материала является применение полученных знаний на практике. В свою очередь, одним из важнейших показателей эффективности выполненной практической работы является наглядность ее результатов. Так, завершающим этапом уникального курса, который реализуется на кафедре СМЗ МГТУ им. Н.Э. Баумана, является разработка системы управления (СУ) зенитной управляемой ракеты (ЗУР) и комплексный анализ ее работоспособности. Зачастую этот анализ заключается в исследовании динамических характеристик движения управляемой ракеты [1, 2]. Несмотря на высокую степень адекватности получаемых при этом результатов, данный метод не является в должной мере наглядным. Для улучшения восприятия результатов моделирования был разработан и создан комплексно-моделирующий стенд угловой динамики движения ЗУР.

Стенд обеспечивает наглядную демонстрацию работы проектируемой СУ. В частности, он имитирует изменение углов отклонения рулей и угла тангажа ЗУР, что позволяет дать оценку работы СУ в целом.

Управление работой модели ЗУР осуществляется при помощи платы Arduino UNO [3, 5].

Управление отклонением рулей по каналу тангажа производится при помощи узла управления, включающего шаговый двигатель 28BYJ — 48 и драйвер ULM2003.

Основные характеристики узла управления:

- 1) скорость вращения — 15 об/мин;
- 2) параметры электропитания:
 - а) напряжение питания — 5 В;
 - б) ток в цепи электропитания — 320 мА;
- 3) сопротивление фазовых цепей двигателя относительно цепи электропитания — 41 Ом;
- 4) количество шагов ротора — 64;
- 5) коэффициент редукции — $1/63,68395$;
- 6) угол шага двигателя без учета редуктора — $11,25^\circ$;
- 7) количество шагов вала мотора 28BYJ-48 за один оборот — $32 \cdot 64 = 2048$;
- 8) крутящий момент, не менее — $34,3 \text{ мН} \cdot \text{м}$ (120 Гц);
- 9) тормозящий момент — от 600 до $1200 \text{ г} \cdot \text{см}$;
- 10) тяга — $300 \text{ г} \cdot \text{см}$;
- 11) масса — 33 г.

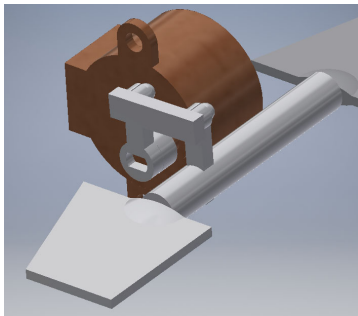


Рис. 1. Схема передачи вращательного движения к рулям канала тангажа

Выбор данного привода обуславливается низкой ценой, достаточно высоким быстродействием и точностью углового перемещения ротора. Передача вращательного движения от шагового двигателя на ось рулей канала тангажа осуществляется посредством качалки (рис. 1).

Шаговый двигатель не имеет встроенного потенциометра. В связи с этим необходимо было предусмотреть возможность выставки рулей в начальное положение. Для выполнения данной задачи используется микропереключатель 125V5A. При активации программы калибровки рули начинают отклоняться в положительном направлении до касания микропереключателя, что приводит к его срабатыванию. После этого на шаговый двигатель поступает команда на поворот в отрицательном направлении на заданное количество шагов, которое приведет к выставке рулей «в ноль». Требуемое количество шагов определяется единожды, при первичной калибровке стенда после сборки.

Схема подключения шагового двигателя к плате Arduino UNO с помощью драйвера ULN2003 представлена на рис. 2.

Питание Arduino UNO рассчитано на подключение лишь одного устройства. Вследствие этого, для питания сервопривода используется отдельный блок, состоящий из четырех элементов питания типа АА. Суммарное напряжение такого блока составляет 6 В, что позволяет увеличить мощность сервопривода.

Питание Arduino UNO рассчитано на подключение лишь одного устройства. Вследствие этого, для питания сервопривода используется отдельный блок, состоящий из четырех элементов питания типа АА. Суммарное напряжение такого блока составляет 6 В, что позволяет увеличить мощность сервопривода.

Вращение ЛА вокруг поперечной оси осуществляется с помощью сервопривода. Модель привода выбирали исходя из требований к значению крутящего

момента. Момент инерции модели ракеты (без стоек) равен $1,6 \cdot 10^{-3}$ кг · м. Данные получены с помощью пакета Autodesk Inventor.

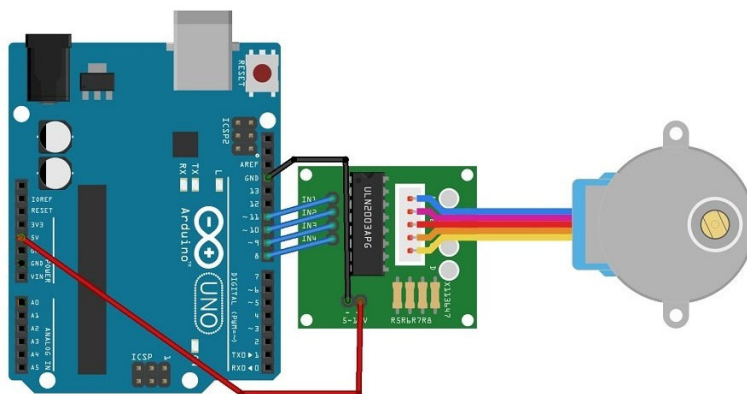


Рис. 2. Схема подключения шагового двигателя

При выборе сервопривода необходимо учитывать, что он должен обеспечивать отклонение модели ракеты при моделировании полета ЗУР, в том числе и с некорректно синтезированной системой управления. Требуемое угловое ускорение было выбрано равным 10 рад/с^2 . При этом требуемый момент, согласно формуле $M = I\varepsilon$, составляет $M = 16 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}$ или $15,68 \text{ кг} \cdot \text{см}$. Данным условиям удовлетворяет привод FS5519M.

Основные характеристики привода FS5519M:

- 1) диапазон вращения $0 \dots 180^\circ$;
- 2) напряжение питания $4,8 \dots 7,4 \text{ В}$
- 3) крутящий момент $18,5 \text{ кг} \cdot \text{см}$;
- 4) скорость вращения 60° за $0,15 \text{ с}$;
- 5) внутренний интерфейс — цифровой;
- 6) тип мотора — бесколлекторный;
- 7) материал шестерней — титан;
- 8) материал корпуса — пластик, алюминий;
- 9) габаритные размеры $40,8 \times 20,1 \times 38 \text{ мм}$;
- 10) масса 40 г .

В процессе создания стенда осуществлялось моделирование его конструкции в пакете Autodesk Inventor с последующей печатью на 3D-принтере. Печать была заказана на сайте <https://3dnetprint.com/>

Отсутствие жестких требований к прочностным и точностным характеристикам стенда позволило выбрать 3D-принтер исходя из стоимости и доступности печати [6]. Таким образом, был выбран принтер Zortax M300, позволяющий выполнить печать элементов конструкции стенда требуемых размеров.

Основные характеристики принтера Zortax M300 [7]:

- 1) максимальная температура экструдера $380 \text{ }^\circ\text{C}$. Данная температура обеспечивает плавление пластика ABS, имеющего температуру плавления $350 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 2) температура рабочей поверхности (стола) принтера $110 \text{ }^\circ\text{C}$;

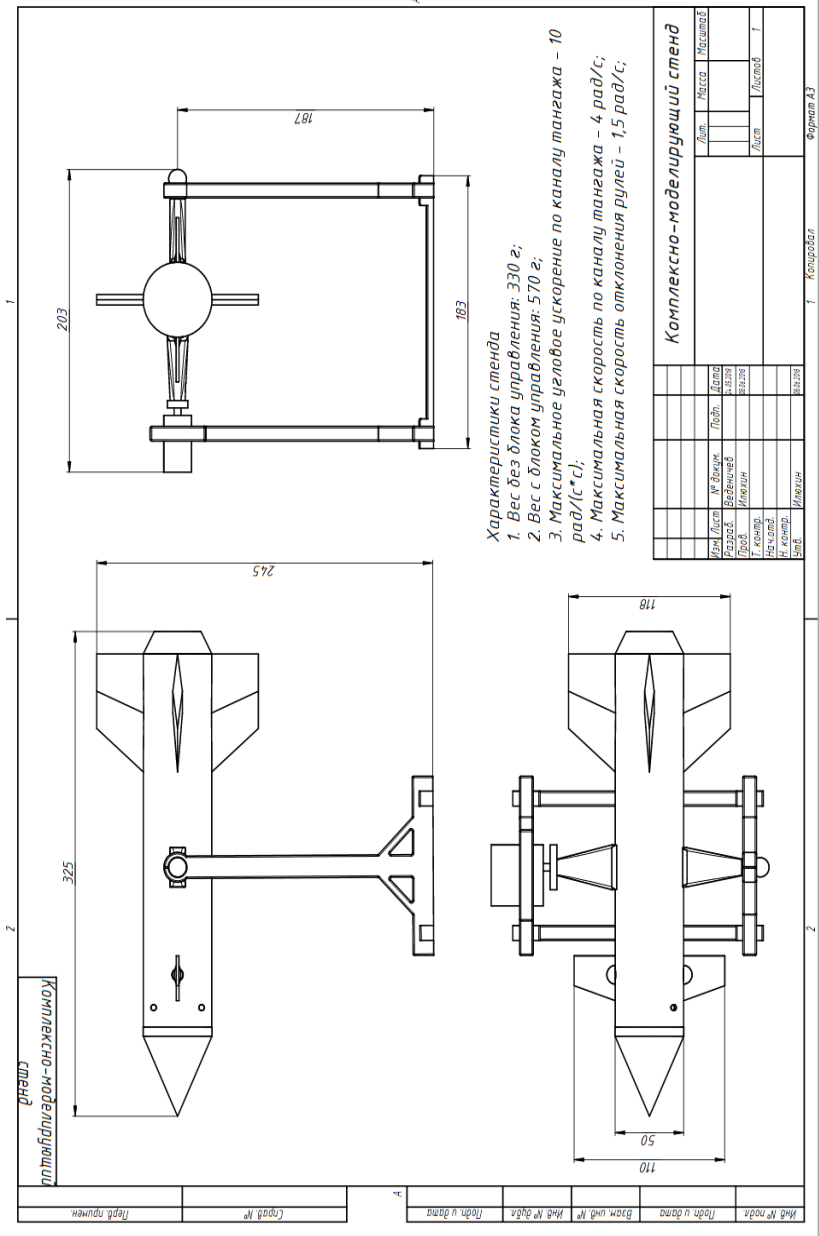


Рис. 3. Габаритный чертеж комплексно-моделирующего стенда ЗУР

3) толщина сопла экструдера 0,4 мм, при этом толщина одного слоя печати составляет 140...300 мкм;

4) скорость печати 50...70 мм/с (может достигать 100 мм/с).

В качестве материала для 3D-печати можно использовать катушку пластикового материала диаметром 1,75 мм одного из следующих типов: Z-PHA, Z-HIPS, Z-GLASS, Z-PETG.

Габаритный чертеж стенда представлен на рис. 3.

Модель, реализованная с помощью принтера Zortax M300, представлена на рис. 4.

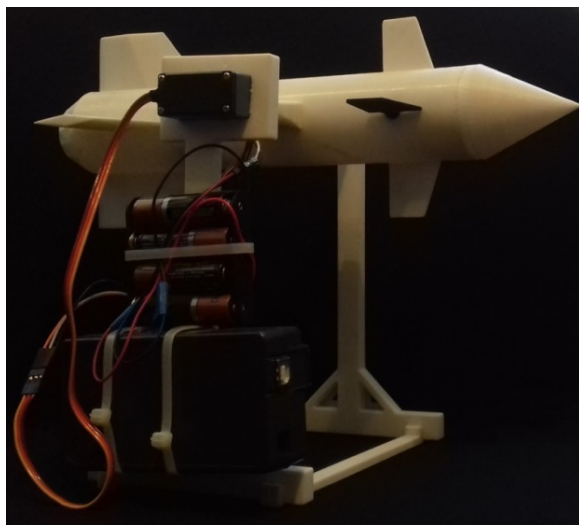


Рис. 4. Комплексно-моделирующего стенда ЗУР

Управление сервоприводом и шаговым двигателем осуществляется с помощью платы Arduino UNO и соответствующего ей программного обеспечения Arduino IDE, которое содержит библиотеки, обеспечивающие работу с сервоприводом и шаговым двигателем выбранной модели.

Расчет параметров полета осуществляется в пакете MATLAB. Simulink [8–11]. Далее значения отклонения рулей и угла тангажа модели ракеты загружаются в программу моделирования, написанную в среде Arduino IDE. После подключения платы Arduino UNO и запуска программы моделирования осуществляется управление приводами согласно заданной программе.

Поскольку библиотеки пакета MATLAB поддерживают работу с платой Arduino UNO, была рассмотрена возможность загрузки данных напрямую. Данный вариант имеет очевидное преимущество — отсутствие промежуточных ПО, увеличивающих время подготовки. Однако у данного метода имеется и существенный недостаток. Загрузка данных на плату Arduino UNO производится поточно. Это приводит к тому, что загрузка последующего значения требуемого положения рулей и угла тангажа модели ракеты производится только после выполнения предыдущей команды. Таким образом, существенно увеличивается общее время моделирования полета.

Рассмотрим задачу с последующим моделированием на стенде.

Сформулируем начальные условия.

Цель:

$V_c = -360$ м/с — скорость движения;

$H_0 = 9,5$ км — высота полета;

ЗУР:

$V_0 = 400$ м/с — скорость после разделения разгонной ступени;

$m = 370,2$ кг — начальная масса;

$d = 0,3$ м — диаметр мидаля;

$L_{la} = 6,68$ м — длина.

Далее рассчитаем параметры полета в пакете MATLAB Simulink. Значение полученных отклонения рулей и угла тангажа модели ракеты представлены на рис. 5.

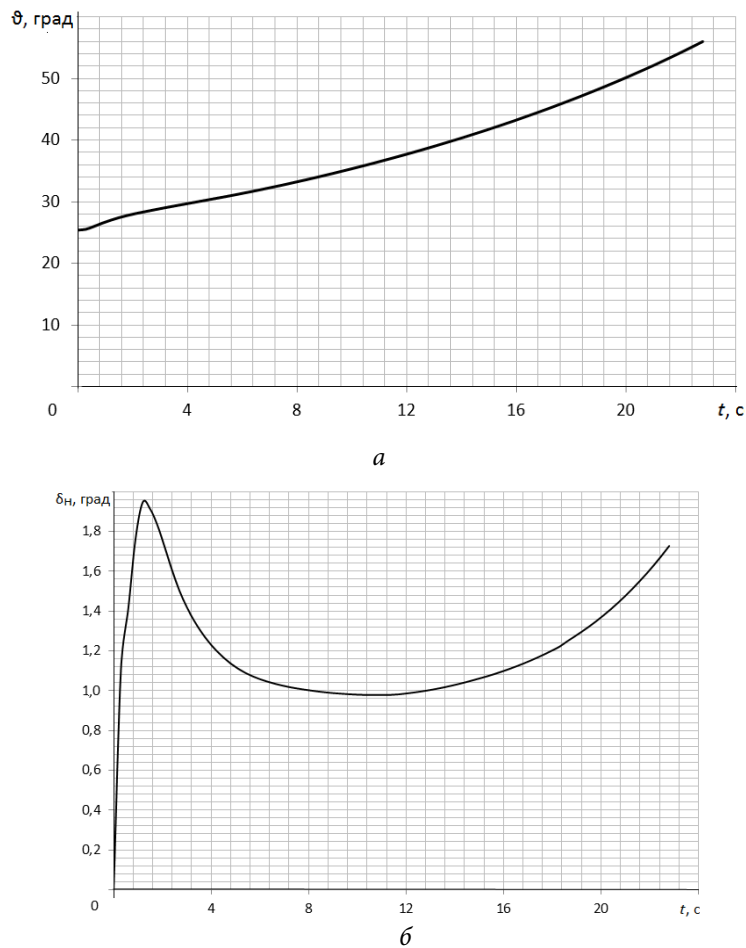


Рис. 5. Угол тангажа (*a*) и отклонения рулей (*b*) в зависимости от времени

Загружаем на плату программу моделирования напрямую. При запуске стенда можно убедиться, что модель работает корректно, следовательно, синтез СУ ЗУР проведен верно.

Рассмотрим графики угла тангажа и изменения углов отклонения рулей и траекторию полета для иной СУ (рис. 6, 7).

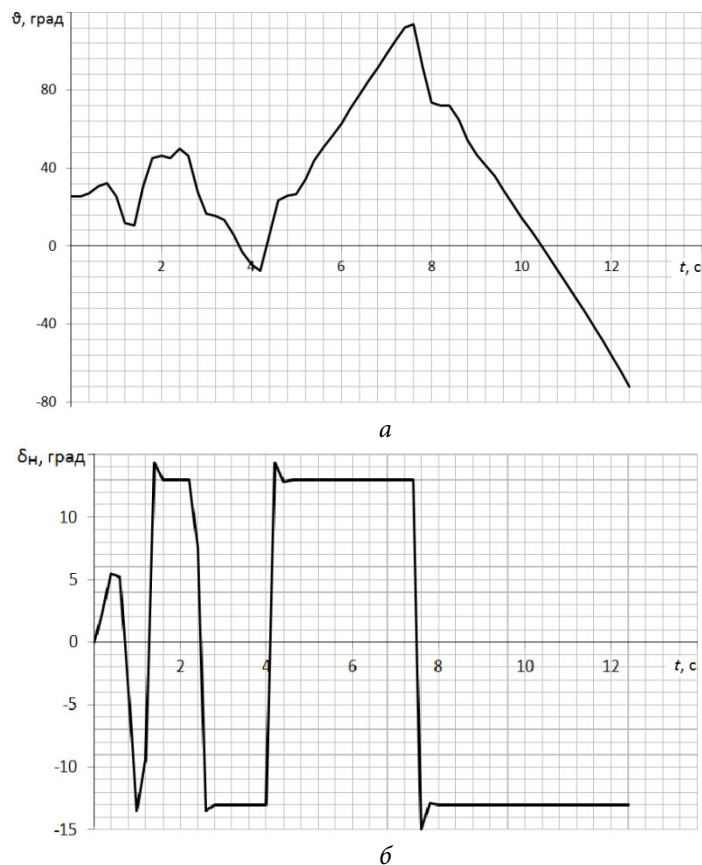


Рис. 6. Угол тангажа (а) и отклонения рулей (б) в зависимости от времени

Очевидно, что такая СУ неустойчива. Это можно наблюдать, запустив работу стенда с предварительно загруженной на плату программой.

Выводы. Таким образом, применение описываемого комплексно-моделирующего стенда позволяет не только визуализировать процесс угловой динамики движения ЗУР при различных значениях углов отклонения рулей канала тангажа, но и проводить исследования характеристик канала тангажа при проектировании и отработке систем управления.

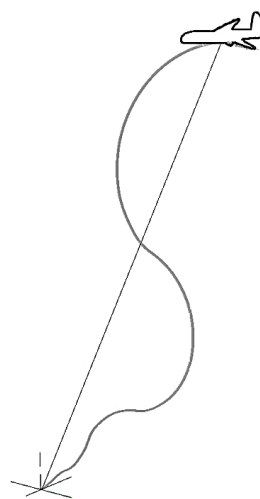


Рис. 7. Траектория полета с иной системой управления

Литература

- [1] Илюхин С.Н. Создание системы управления зенитной ракеты методом логарифмических амплитудных характеристик. *Молодежный научно-технический вестник*, 2012, № 5. URL: <http://ainsnt.ru/doc/458169.html>
- [2] Илюхин С.Н., Беневольский С.В., Грабин В.В. Формирование облика зенитной управляемой ракеты и динамический анализ её системы управления. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
- [3] Петин В.А. Проекты с использованием контроллера Arduino. СПб., БХВ-Петербург, 2015.
- [4] Блум Д. Изучаем Arduino. Инструменты и методы технического волшебства. СПб., БХВ-Петербург, 2015.
- [5] Илюхин С.Н., Топорков А.Г., Корянов В.В. и др. Актуальные аспекты разработки системы управления перспективными беспилотными летательными аппаратами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, № 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2015-9-1450 URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1450.html>
- [6] Сагалаев Г.В., Абрамов В.В., Кулезнев В.В. и др. Справочник по технологии изделий из пластмасс. М., Химия, 2000.
- [7] Канесса Э., Фондо К., Зеннаро М., ред. Доступная 3D печать для науки, образования и устойчивого развития. Мирамар, МЦТФ, 2013.
- [8] Голубев И.С., Светлов В.С., ред. Проектирование зенитных управляемых ракет. М., Изд-во МАИ, 2001.
- [9] Никанорова М.Д., Веденичев И.В. Использование пакета MATLAB.Simulink при баллистических расчетах. *Политехнический молодежный журнал*, 2017, № 10. DOI: 10.18698/2541-8009-2017-10-183 URL: <http://ptsj.ru/catalog/arise/adbmc/183.html>
- [10] Илюхин С.Н., Клишин А.Н. Оценка производительности бортового вычислителя беспилотного летательного аппарата при реализации процесса наведения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, № 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-7-1781 URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1781.html>
- [11] Платунова А.В., Клишин А.Н., Илюхин С.Н. Особенности формирования адаптивных законов управления высокоточными летательными аппаратами. *Инженерный вестник*, 2016, № 10. URL: <http://engsi.ru/doc/851360.html>

Веденичев Игорь Васильевич — выпускник кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Саитова Зифа Габдуллоевна — студентка кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Илюхин Степан Николаевич, ассистент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

THE DEVELOPMENT OF A COMPLEX SIMULATION STAND OF AN AIR DEFENCE GUIDED MISSILE FLIGHT ANGULAR DYNAMICS

I.V. Vedenichev

vedenicheviv@gmail.ru

SPIN-code: 8215-0660

Z.G. Saitova

saitova.z@mail.ru

SPIN-code: 4612-5123

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The creation and practical use of a complex-simulation stand of angular dynamics of an air defence guided missile is considered. The dimensional drawing of the simulation stand is introduced. The description of the devices that set the rocket model in motion is given. The imitation of rocket angular motion is performed by changing the position of the rocket model with the help of a servo controlled by the Arduino UNO board. The connection of the servo drive to the board is described. The variation of the deflection angle of the model rudders is provided by a stepper motor controlled by the Arduino UNO board. The features of used devices are taken into account during building a simulation stand. A selection of a 3D- printer, which makes it possible to manufacture the elements of stand construction, has been carried out.

Keywords

Simulation stand, air defence guided missile, Arduino, MATLAB, Simulink, 3D printer, angular missile dynamics, control system

Received 21.01.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Ilyukhin S.N. Developing control system for surface-to-air missile using log-magnitude diagram method. *Molodezhnyy nauchno-tehnicheskiy vestnik*, 2012, no. 5. URL: <http://ainsnt.ru/doc/458169.html> (in Russ.).
- [2] Ilyukhin S.N., Benevol'skiy S.V., Grabin V.V. Conceptual design of guided surface-to-air missile and dynamical analysis of its control system. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012 (in Russ.).
- [3] Petin V.A. Proekty s ispol'zovaniem kontrollera Arduino [Project using Andruino controller]. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2015 (in Russ.).
- [4] Blum J. Exploring Arduino. Tools and techniques for engineering wizardry. Wiley, 2013. (Russ. ed.: Izuchaem Arduino. Instrumenty i metody tekhnicheskogo volshebstva. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2015.)
- [5] Ilyukhin S.N., Toporkov A.G., Koryanov V.V., et al. Actual aspects of control system development for advanced unmanned aerial vehicles. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2015, no. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2015-9-1450 URL: <http://engjournal.ru/catalog/arse/adb/1450.html> (in Russ.).
- [6] Sagalaev G.V., Abramov V.V., Kuleznev V.V., et al. Spravochnik po tekhnologii izdeliy iz plastmass [Handbook on plastic products technology]. Moscow, Khimiya Publ., 2000 (in Russ.).

-
- [7] Canessa E., Fonda C., Zennaro M., eds. Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development. ICTP, 2013. (Russ. ed.: Dostupnaya 3D pechat' dlya nauki, obrazovaniya i ustoychivogo razvitiya. Miramar, MTsTF Publ., 2013.)
- [8] Golubev I.S., Svetlov V.S., eds. Proektirovanie zenitnykh upravlyaemykh raket [Guided surface-to-air missile engineering]. Moscow, MAI Publ., 2001 (in Russ.).
- [9] Nikanorova M.D., Vedenichev I.V. Using the MATLAB.SIMULINK software suite for ballistic analysis. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2017, no. 10. DOI: 10.18698/2541-8009-2017-10-183 URL: <http://ptsj.ru/catalog/arise/adbmc/183.html> (in Russ.).
- [10] Ilyukhin S.N., Klishin A.N. On-board computer efficiency evaluation of unmanned aerial vehicles (UAV) when implementing the targeting process. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2018, no. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-7-1781 URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1781.html>
- [11] Platunova A.V., Klishin A.N., Ilyukhin S.N. Special aspects of adaptive control laws formation for high precision aircraft. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2016, no. 10. URL: <http://engsi.ru/doc/851360.html> (in Russ.).

Vedenichev I.V. — Graduate Student, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Saitova Z.G. — Student, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Ilyuxin S.N., Assistant, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.