

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-111-127>

Моделирование испытательного стенда конструктивных элементов органов управления самолета

С.Ф. Яцун ¹, А.В. Мальчиков ¹ ✉, А.С. Яцун ¹, Е.В. Субботин ¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: zveroknp@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Повышение эффективности функционирования испытательных стендов конструктивных элементов органов управления самолета за счет учета динамических особенностей электромеханической системы, исследуемых с применением математической модели, учитывающей особенности аппаратной реализации приводной и измерительной систем стенда.

Задачи. Разработка математической модели приводной системы исполнительного звена испытательного стенда, получение динамических характеристик управляемого движения электромеханической системы стенда и поворотного переключателя из состава органов управления экипажа самолета.

Методы. Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования динамических систем, теории управления и теории механизмов и машин. При создании программных продуктов использованы математические пакеты Matlab/Simulink. Для оценки влияния свойств упругой муфты на динамику движения исполнительного звена использовались квадратичная ошибка по положению и скорости, а также их интегральные значения.

Результаты. В ходе исследования была разработана математическая модель испытательного стенда, включающая приводную и измерительную системы, устройство сопряжения и объект тестируемого оборудования. В процессе вычислительных экспериментов были установлены предельные значения крутящего момента и скорости вращения исполнительного звена, а также выполнен анализ влияния параметров упруго-вязких свойств элементов сопряжения на движение поворотного переключателя.

Заключение. В работе установлено, что импульсный характер изменения крутящего момента оказывает влияние на движение исполнительного звена стенда. Для снижения эффекта предложено использовать вязкоупругий элемент сопряжения, который позволяет снизить колебательность исполнительного звена стенда с сохранением высокой точности движения.

Ключевые слова: математическое моделирование; испытательные стенды; авиационное оборудование; шаговый двигатель.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

Для цитирования: Моделирование испытательного стенда конструктивных элементов органов управления самолета / С.Ф. Яцун, А.В. Мальчиков, А.С. Яцун, Е.В. Субботин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 111-127. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-111-127>.

Поступила в редакцию 05.08.2023

Подписана в печать 20.09.2023

Опубликована 28.10.2023

© Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Яцун А.С., Субботин Е.В., 2023

Simulation of the Test Bench of Structural Elements of Aircraft Controls

Sergey F. Yatsun ¹, Andrey V. Mal'chikov ¹ ✉, Andrei S. Yatsun ¹,
Evgeniy V. Subbotin ¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: zveroknnp@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Improving the efficiency of the test benches of the structural elements of the aircraft controls, by taking into account the dynamic features of the electromechanical system, studied using a mathematical model that takes into account the features of the hardware implementation of the drive and measuring systems of the stand.

Tasks. Development of a mathematical model of the drive system of the executive link of the test bench, obtaining dynamic characteristics of the controlled movement of the electromechanical system of the stand and the rotary switch from the aircraft crew controls.

Methods. Methods of mathematical modeling of dynamic systems, control theory and theory of mechanisms and machines were used to solve the tasks. When creating software products, Matlab/Simulink mathematical packages were used. To assess the influence of the properties of the elastic coupling on the dynamics of the movement of the executive link, the quadratic error in position and speed, as well as their integral values, were used.

Results. In the course of the research, a mathematical model of the test bench was developed, including the drive and measuring systems, the interface device and the object of the tested equipment. In the course of computational experiments, the maximum values of the torque and the rotational speed of the executive link were established, and the influence of the parameters of the elastic-viscous properties of the interface elements on the movement of the rotary switch was analyzed.

Conclusion. It is established in the work that the pulsed nature of the torque change affects the movement of the executive link of the stand. To reduce the effect, it is proposed to use a viscoelastic coupling element, which reduces the oscillation of the executive link of the stand while maintaining high accuracy of movement.

Keywords: mathematical modeling; test benches; aviation equipment; stepper motor.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Financing: The work is supported by the program "Priority 2030".

For citation: Yatsun S. F., Mal'chikov A. V., Yatsun A. S., Subbotin E. V. Simulation of the Test Bench of Structural Elements of Aircraft Controls. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3): 111-127 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-111-127>.

Received 05.08.2023

Accepted 20.09.2023

Published 28.10.2023

Введение

При разработке и настройке авиационного оборудования важнейшим этапом является процедура сертификации, устанавливающая соответствие воздушного судна и его систем требованиям норм летной годности [1-3]. При этом сегодня акцент с контроля готовой продукции смещается в сторону контроля и управления процессами ее создания. На основе во многом зарубежного опыта сегодня активно внедряется принцип «сквозной» сертификации при проектировании воздушных судов, предполагающий промежуточный контроль составных частей и комплектующих авиационной продукции, при участии в ней всех специалистов, занятых в полном жизненном цикле авиационной продукции [1, 2].

При испытаниях бортовых систем воздушных судов применяется специализированное оборудование, позволяющее осуществлять калибровочные ресурсные и поверочные испытания в различных режимах и внешних условиях [4-5]. Особенностью электромеханических систем испытательных стендов является высокая точность и повторяемость движения их исполнительных звеньев в широком диапазоне внешних условий, значительный запас прочности и стойкости к воздействию различных факторов, позволяющих сохранять требуемые эксплуатационные характеристики в течение длительного времени.

Для обеспечения высокой точности и надежности стендов, при проектировании необходим учет не только условий эксплуатации, но и влияния особенностей функционирования электромеханических систем оборудования на результаты измерений. Одним из путей повышения качества и темпов разработки является использование математического имитационного моделирования, позволяющего определить требуемые электромеханические параметры системы, выполнить оценку точности проектируемой системы.

В работе рассматривается электромеханическая система испытательного стенда для автоматизированной настройки и тестирования конструктивных элементов из состава органов управления экипажа самолета. В задачи испытательного стенда входит определение соответствия авиационного оборудования требуемым техническим характеристикам, выявление брака и установление численных значений перемещений и усилий, характеризующих его работу. Импульсный характер изменения крутящего момента, формируемого шаговым двигателем, используемым в стенде, упруго-диссипативные свойства измерителя и исполнительно звена стенда, сопрягаемого с тестируемым авиационным оборудованием, оказывают непосредственное влияние на результаты измерений. Таким образом, испытательный стенд, рассматриваемый в работе,

представляет собой сложное мехатронное устройство, учет динамики движения исполнительных звеньев которого необходим на всех этапах разработки и внедрения. Одним из эффективных путей решения данной задачи является использование математического моделирования, позволяющего определить требуемые параметры устройства, а также установить закономерности, характеризующие динамику управляемого движения электромеханической системы испытательного стенда [6-8].

Целью работы является повышение эффективности функционирования испытательных стендов конструктивных элементов органов управления самолета,

за счет учета динамических особенностей электромеханической системы, исследуемых с применением математической модели, учитывающей особенности аппаратной реализации измерительной системы стенда.

Материалы и методы

В работе рассматривается испытательный стенд для определения технических характеристик поворотного переключателя (ПП), и определения соответствия параметров требованиям технической документации на устройство. Проектный облик испытательного стенда с установленным ПП показан на рис.1.

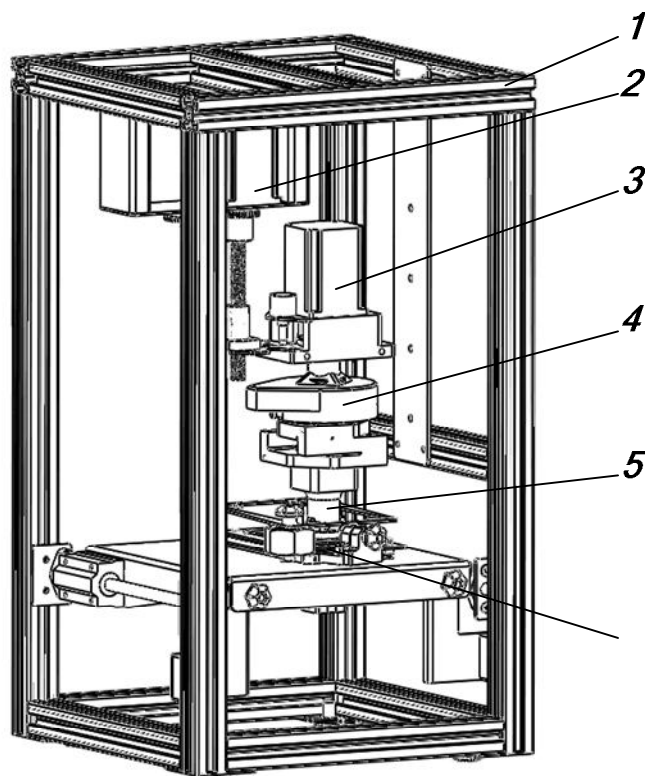


Рис. 1. Проектный облик испытательного стенда: 1 – несущая рама; 2 – привод вертикальной подачи; 3 – поворотный привод; 4 – измерительная система; 5 – элементы сопряжения стенда с исполнительным звеном переключателя; 6 – поворотный переключатель (ПП)

Fig. 1. Design of the test bench: 1 – supporting frame; 2 – vertical feed drive; 3 – rotary drive; 4 – measuring system; 5 – elements of interface of the stand with the switch executive link; 6 – rotary switch

Принцип работы заключается в следующем: перед началом испытаний испытуемый ПП фиксируется в стенде с помощью специализированных креплений; затем с помощью элементов сопряжения стыкуется с приводной системой; далее оператор задает параметры и инициализирует необходимый тип испытаний. После выполнения комплекса движений измерений стенд формирует отчет о результатах испытаний.

В данном случае приводная система включает два шаговых привода, отвечающих за нажатие и поворот рукоятки переключателя. Стенд содержит

двухкоординатный измеритель, определяющий параметры нагружения исполнительного звена переключателя в процессе испытаний. Вертикальный привод реализован с использованием шариковинтовой передачи, а поворот переключателя реализуется за счет непосредственного движения вала шагового двигателя, крутящий момент на рукоятку при этом передается посредством упругих элементов сопряжения.

Рассмотрим более подробно движение и модель поворотного привода, для чего перейдем к схеме с одним шаговым двигателем (рис. 2).

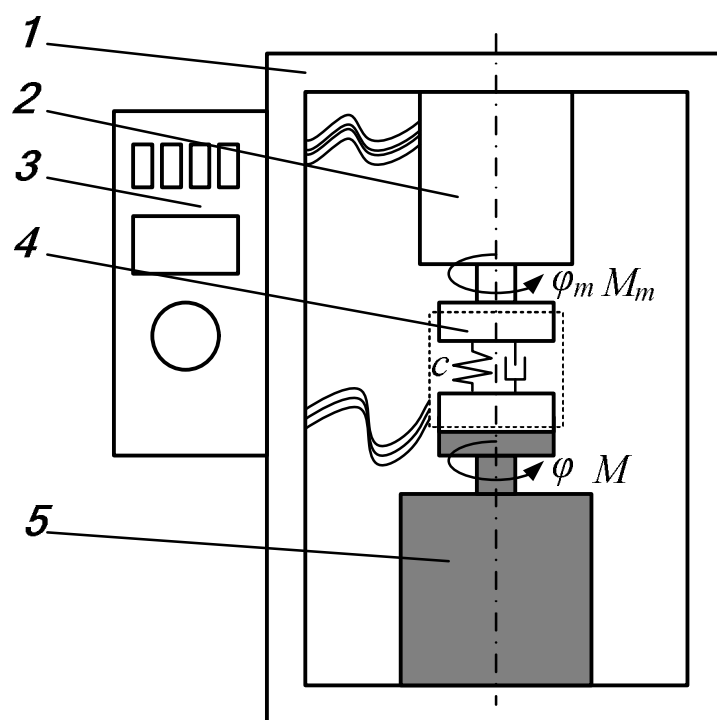


Рис. 2. Схема поворотного привода испытательного стенда: 1 – рама стенда; 2 – поворотный привод; 3 – блок управления; 4 – элементы сопряжения стенда; 5 – поворотный переключатель

Fig. 2. The scheme of the rotary drive of the test bench: 1 – frame of the stand; 2 – rotary actuator; 3 – control unit; 4 – interface elements of the stand; 5 – rotary switch

Согласно схеме: привод станда, сопряженный с ПП посредством упруго-вязкого элемента, может быть описан следующей системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} = c(\varphi - \varphi_m) + b(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_m) - M_c \\ J_m\ddot{\varphi}_m = M_m - c(\varphi - \varphi_m) - b(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_m), \end{cases} \quad (1)$$

где J , J_m – приведенные моменты инерции на валу переключателя и двигателя соответственно; c , b – коэффициенты упругости и вязкости элемента сопряжения станда и переключателя; M_c –

момент сопротивления ПП; M_m – крутящий момент шагового двигателя.

Важнейшим компонентом представленной системы является гибридный шаговый двигатель, который содержит две одинаковые обмотки А и В и гибридный зубчатый ротор (рис.3, б). Далее по тексту, значения напряжений питания, ЭДС, токов и т.д. для соответствующих обмоток обозначим индексами а и б.

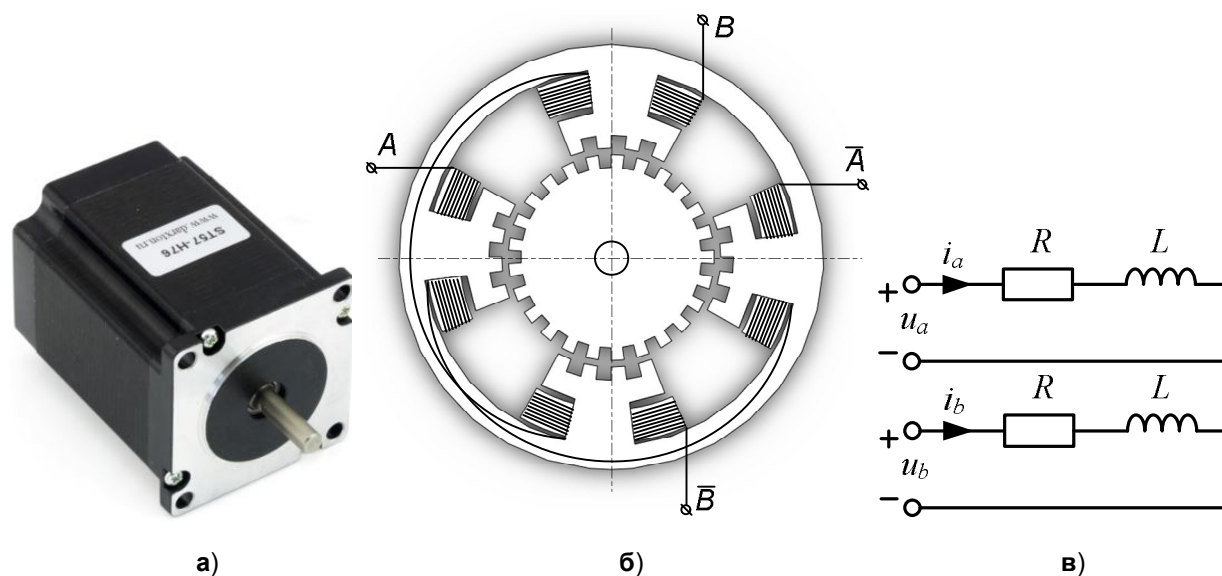


Рис. 3. Гибридный ШД NEMA23 (FL57STH76-2804A)

Fig. 3. Hybrid stepper motor NEMA23 (FL57STH76-2804A)

Согласно второму закону Кирхгофа для обмоток шагового двигателя (рис.3, в) справедливы выражения для производной от силы тока на каждой обмотке [9]:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = (u_a - Ri_a - e_a)/L \\ \frac{di_b}{dt} = (u_b - Ri_b - e_b)/L, \end{cases} \quad (2)$$

где i_a , i_b – токи на обмотках; u_a , u_b – питающие напряжения от системы управления; R , L – активное сопротивление и

индуктивность; e_a и e_b – противоЭДС, обусловленное влиянием магнитного поля ротора при вращении.

ПротивоЭДС определяются следующим образом [9]:

$$\begin{cases} e_a = -k_m \dot{\varphi}_m \sin(N_r \varphi_m) \\ e_b = -k_m \dot{\varphi}_m \sin(N_r(\varphi_m - \lambda)), \end{cases} \quad (3)$$

где φ_m – угол поворота ротора двигателя; N_r – количество зубьев на каждом из

двух полюсов ротора; λ – угол между полюсами обмоток статора (для рассматриваемого двигателя $\lambda = \pi/2$); k_m – моментный коэффициент, зависящий от конструкции ротора и величины максимального потокоцепления, создаваемого его постоянным магнитом.

Электромагнитный крутящий момент, создаваемый двигателем, будет иметь следующий вид [9]:

$$M_m = k_m [-i_a \sin(N_r \varphi_m) + i_b \cos(N_r \varphi_m)] - M_d \sin(4N_r \varphi_m), \quad (4)$$

где M_d – амплитуда фиксирующего момента, обусловленного взаимодействием магнитного поля ротора с сердечниками статорных обмоток (в рамках данной работы примем $M_d = 0$).

В отличие от коллекторных двигателей постоянного тока, напряжения, прикладываемые к обмоткам ШД, должны иметь импульсный характер, каждое переключение которых приводит к дискретному перемещению вала двигателя. В рамках настоящей работы будем рассматривать полношаговый режим работы гибридного шагового двигателя, при котором одновременно задействованы обе статорные обмотки. Таким образом, питающие напряжения u_a , u_b формируются системой управления программно.

Поворотный переключатель, рассматриваемый в работе, конструктивно выполнен таким образом, что при угле поворота на угол значением $\pm 30^\circ$ ощущается проходной упор для тактильной индикации пилоту. При этом величина сопротивления при прохождении через проходной упор составляет примерно 0,5 Нм. Таким образом, нелинейный момент сопротивления поворотного переключателя может быть описан кусочно-гармонической функцией следующего вида:

$$M_c = |M_{\max} \sin(k_{Mc} \varphi)| \text{sign}(\dot{\varphi}) + M_{fr}, \quad (5)$$

где $M_{\max}$ – максимальная амплитуда момента сопротивления проходного упора; M_{fr} – момент силы трения; k_{Mc} – коэффициент угловой частоты (для рассматриваемого примера $k_{Mc} = 0.1047$).

Зависимость момента сопротивления (без учета момента трения) от угла поворота переключателя может быть представлена временной диаграммой, показанной на рис.4.

Итоговая математическая модель, описывающая динамику управляемого движения исполнительного звена привода испытательного стенда, сопряженного с рукояткой поворотного переключателя, на основании (1), (2), (3), (4) и (5) будет иметь вид:

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} = c(\varphi - \varphi_m) + b(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_m) - |M_{\max} \sin(k\varphi)| \text{sign}(\dot{\varphi}) - M_{fr} \\ J_m \ddot{\varphi}_m = k_m [-i_a \sin(N_r \varphi_m) + i_b \cos(N_r \varphi_m)] - c(\varphi - \varphi_m) - b(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_m) \\ L \frac{di_a}{dt} = u_a - Ri_a - k_m \dot{\varphi}_m \sin(N_r \varphi_m) \\ L \frac{di_b}{dt} = u_b - Ri_b + k_m \dot{\varphi}_m \cos(N_r \varphi_m). \end{cases} \quad (6)$$

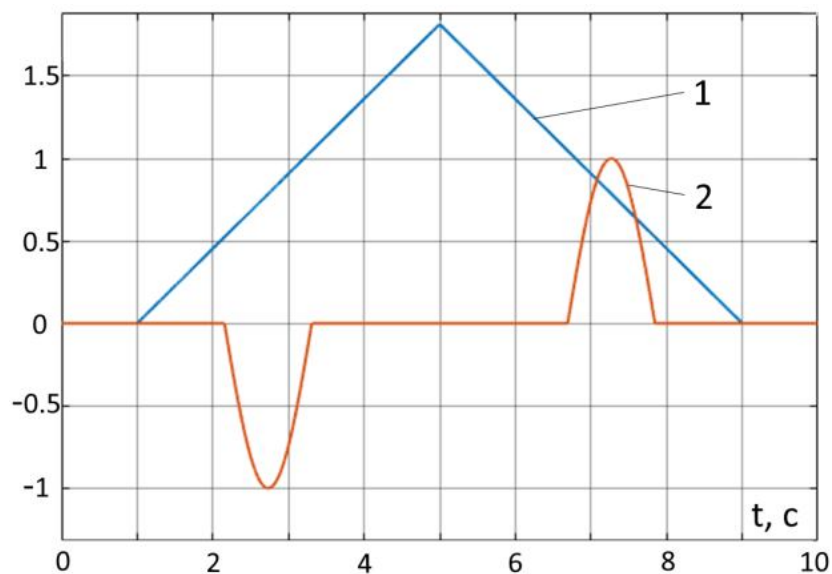


Рис. 4. Временные диаграммы модели нагружения стенда: **1** – угол поворота ПП φ (рад);
2 – момент сопротивления M_c (Нм)

Fig. 4. Time diagrams of the bench loading model: **1** – angle of rotation of the rotary switch φ ,
2 – resistance torque M_c

Момент силы трения может быть определен согласно нелинейной модели, представленной в работах [9-10]. Для получения численного решения была разработана модель в среде Matlab/Simulink [11-12].

Результаты и их обсуждение

В ходе моделирования испытательного стенда, предлагается решить ряд задач, позволяющих установить предельные значения параметров системы управления, а также оценить влияние импульсного характера изменения крутящего момента, создаваемого двигателем, на динамику ПП при использовании переходного звена сопряжения с различными упруго-вязкими свойствами.

Так как согласно механической характеристике двигателя с увеличением

частоты вращения двигателя крутящий момент падает, то в ходе моделирования одной из задач является определение максимально допустимой скорости поворота рукоятки ПП без потери синхронизма шагового двигателя при номинальных параметрах момента сопротивления. В ходе моделирования также предлагается установить предельно допустимый момент сопротивления ПП при номинальной скорости вращения двигателя.

Основные параметры математической модели показаны в табл.1.

С целью определения предельного крутящего момента для привода испытательного стенда покажем результаты моделирования (рис. 5) при линейно растущем моменте сопротивления

$$M_c(t) = -k_{MS}t. (k_{MS} = 1.0).$$

Таблица 1. Параметры модели

Table 1. Model parameters

Наименование параметра / Parameter name	Обозначение / Designation	Значение / Value
Момент инерции исполнительного звена стенда	J	0,005 кгм ²
Жесткость упругой муфты	c	40 Нм/рад
Вязкость упругой муфты	b	0.2 Нмс/рад
Номинальное напряжение	U_n	3.2 В
Моментный коэффициент	k_m	0.66 Нм/А
Количество шагов ШД	N	200
Активное сопротивление обмотки	R	1.13 Ом
Индуктивность обмотки	L	3.6 мГн
Момент инерции ШД	J_m	$45 \cdot 10^{-5}$ кгм ²

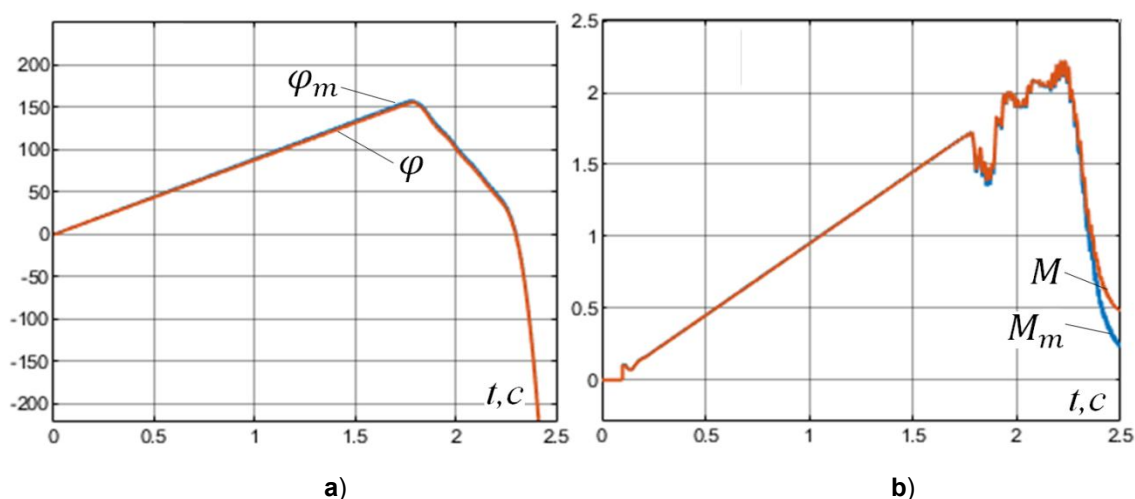


Рис. 5. Численное моделирование потери синхронизма ШД под действием момента сопротивления M_c : **a** – временные диаграммы углов поворота двигателя φ_m° , и переключателя φ° ; **b** – временные диаграммы крутящего момента на двигателе M_m (Нм), на переключателе M (Нм)

Fig. 5. Numerical simulation of the loss of synchronism of the stepper motor under the action of the moment of resistance M_c : **a** – time diagrams of the rotation angles of the motor φ_m° , and rotary switch φ° ; **b** – time diagrams of the motor torque M_m (Nm), switch torque M (Nm)

Как показали результаты численного моделирования при нагружении привода стенда моментом сопротивления 1.72 Нм, шаговый двигатель теряет синхронизм на 1.78 с.

С целью определения предельной скорости вращения при номинальном значении момента сопротивления ($M_c=0,5$ Нм), покажем результаты моделирования (рис. 6) при линейно растущей скорости вращения ШД $\dot{\varphi}^*(t)=k_\omega t$. ($k_\omega=0,356$ об/с).

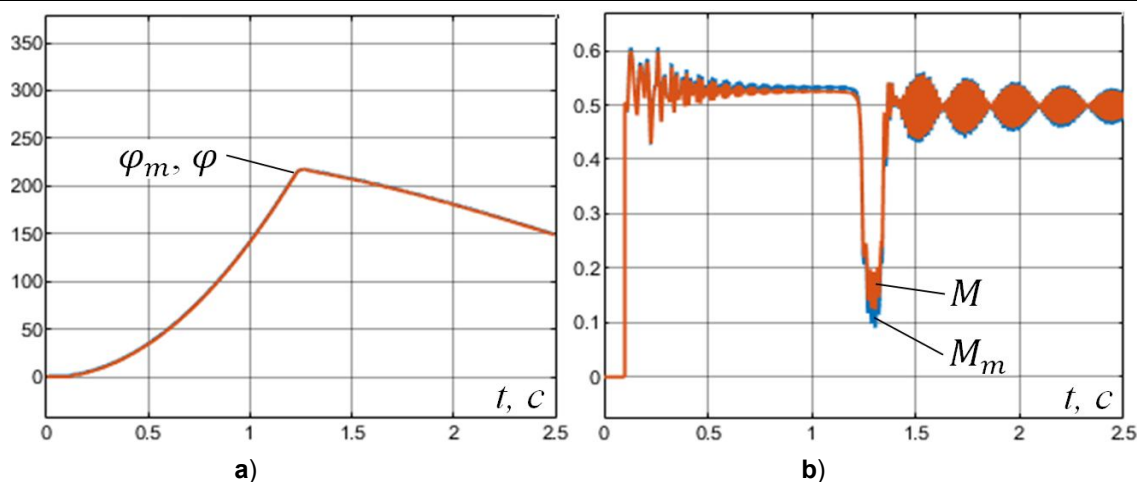


Рис. 6. Численное моделирование потери синхронизма ШД при превышении скорости:

a – временные диаграммы углов поворота двигателя φ_m° , и переключателя φ° ;

b – временные диаграммы крутящего момента на двигателе M_m (Нм), на переключателе M (Нм)

Fig. 6. Numerical simulation of the loss of synchronism of the stepper motor when exceeding the speed: **a** – time diagrams of the rotation angles of the motor φ_m° , and rotary switch φ° ;

b – time diagrams of the motor torque M_m (Nm), switch torque M (Nm)

В ходе моделирования было установлено, что предельная скорость, с которой может осуществляться поворот переключателя с типовой нагрузочной характеристикой ($M_c = 0,5$ Нм), составляет 218 шагов в секунду или 65,4 об/мин.

Наибольший интерес представляет влияние упругих свойств элементов сопряжения приводной системы станда и исполнительного звена ПП на движение с нелинейным моментом сопротивления. Покажем результаты в виде временных диаграмм.

Как показали результаты моделирования, показанные на рис. 7, вязкоупругий элемент «смягчает» переходные процессы в приводной системе, и при указанных параметрах системы ошибка позиционирования не превышает $0,2^\circ$ или менее 0.23% (при жесткости $c = 40$).

Оценку влияния импульсного характера изменения крутящего момента,

создаваемого двигателем, на динамику поворотного выключателя при использовании переходного звена сопряжения с упруго-вязкими свойствами будем производить по величине квадрата ошибки, определяемой согласно:

$$E_\varphi = (\varphi^* - \varphi)^2, \quad (7)$$

где φ^* – желаемый угол поворота исполнительного звена ПП; φ – фактический угол поворота.

Колебательную составляющую движения будем оценивать интегралом квадратичной ошибки скорости, определяемой согласно:

$$E_\omega = (\dot{\varphi}^* - \dot{\varphi})^2, \quad (8)$$

где $\dot{\varphi}^*$ – желаемая скорость поворота исполнительного звена ПП; $\dot{\varphi}$ – фактическая скорость.

Покажем временные диаграммы для предложенных критериев различных жесткостей вязкоупругого элемента сопряжения ($c = 20, 40, 100$ Нм/рад).

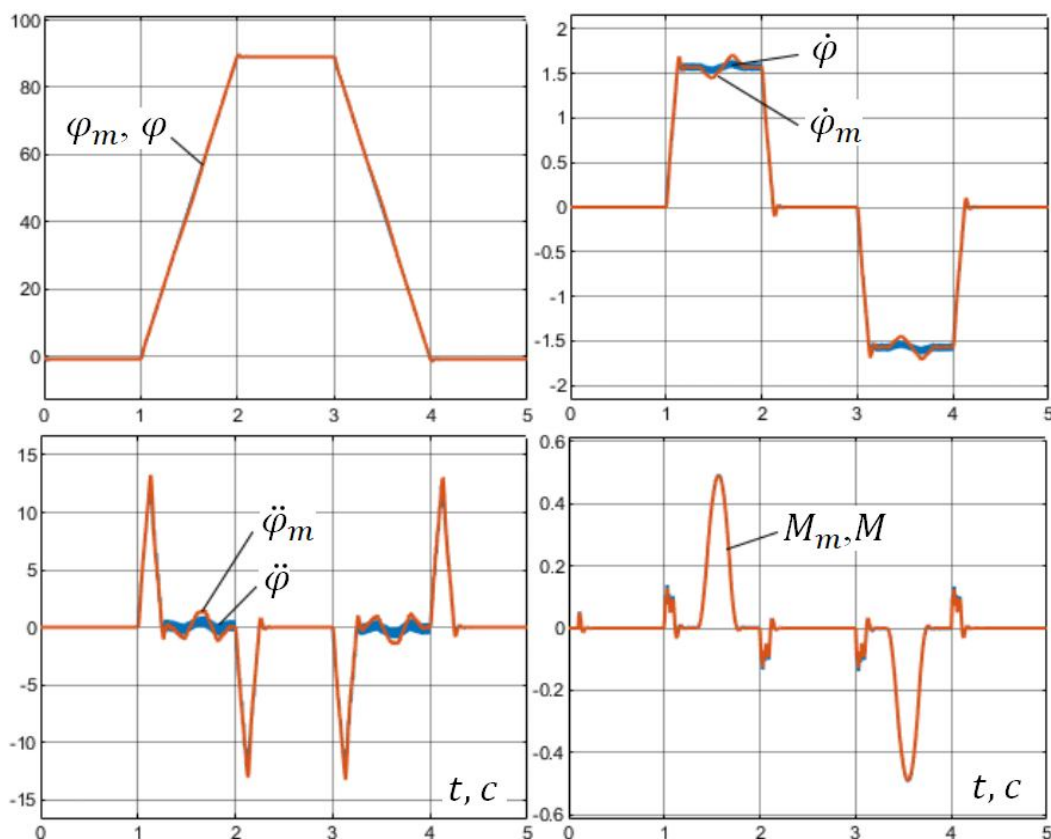


Рис. 7. Моделирование поворота переключателя с нелинейным моментом сопротивления M_c : углы поворота двигателя φ_m° , переключателя φ° , скорости вращения двигателя $\dot{\varphi}_m$ (рад/с), переключателя $\dot{\varphi}$ (рад/с), ускорения двигателя $\ddot{\varphi}_m$ (рад/с²), переключателя $\ddot{\varphi}$ (рад/с²), крутящий момент на двигателе M_m (Нм), на переключателе M (Нм)

Fig. 7. Simulation of the rotation of a switch with a nonlinear moment of resistance M_c : the angles of rotation of the motor φ_m° , the switch φ° , the rotation speed of the motor $\dot{\varphi}_m$ (rad/s), the switch $\dot{\varphi}$ (rad/s), the acceleration of the motor $\ddot{\varphi}_m$ (rad/s²), the switch $\ddot{\varphi}$ (rad/s²), torque on the motor M_m (Nm), on the switch M (Nm)

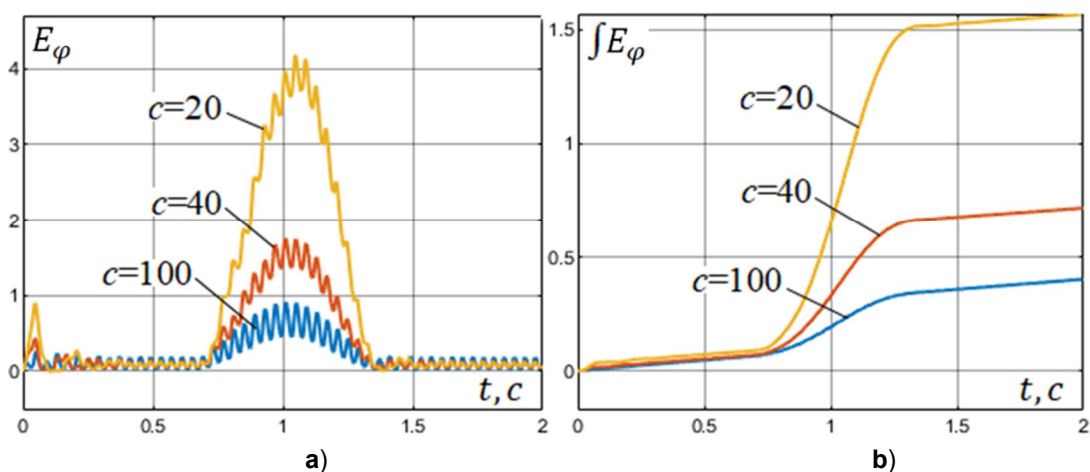


Рис. 8. Временные диаграммы квадратичной ошибки положения E_s (а) и интеграла квадратичной ошибки (б) при повороте ПП с нелинейным моментом сопротивления M_c

Fig. 8. Time diagrams of the square error of the position E_s (a) and the integral of the square error (b) when turning the switch with a nonlinear torque M_c

Как показали результаты моделирования, показанные на рис. 8, снижение жесткости упруго-вязкого элемента сопряжения приводной системы стенда и ПП приводит к повышению величины рассогласования движения выходного звена привода и поворота исполнительного звена переключателя. Интеграль-

ная оценка квадратичной ошибки по углу составляет $\int E_\varphi = 0,4^\circ$ (для $c = 100$), $\int E_\varphi = 0,67^\circ$ (для $c = 40$), $\int E_\varphi = 1,53^\circ$ (для $c = 20$). Таким образом, введение упругого звена снижает общую жесткость системы и приводит к появлению ошибки по положению.

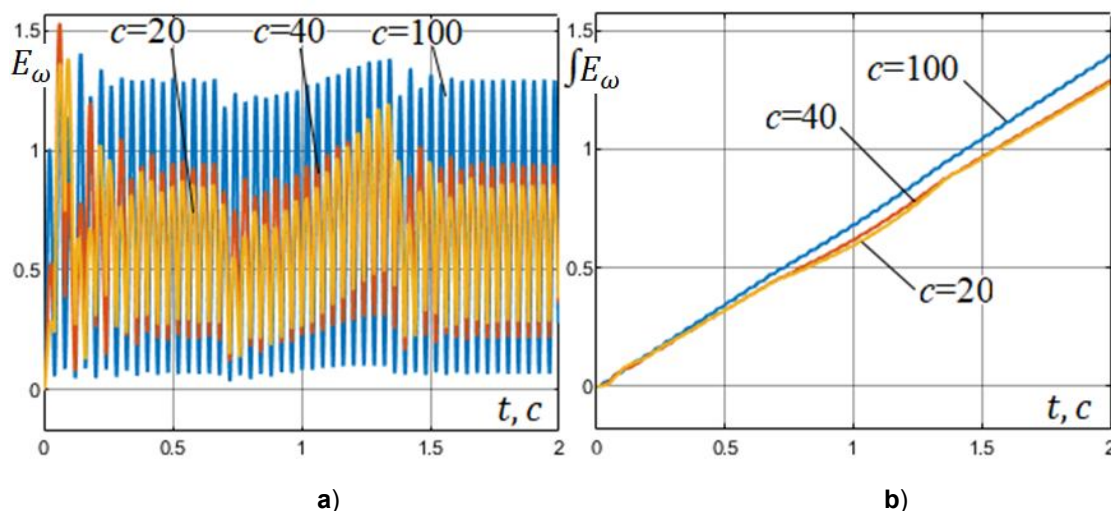


Рис. 9. Временные диаграммы квадратичной ошибки скорости E_ω (а) и интеграла квадратичной ошибки (б) при повороте ПП с нелинейным моментом сопротивления M_c

Fig. 9. Time diagrams of the square velocity error E_ω (а) and the integral of the square velocity error (б) when turning the switch with a nonlinear torque M_c

Анализ графиков ошибки скорости, показанные на рис. 9, говорит о необходимости введения упруго-вязкого элемента для снижения колебательности на исполнительном звене рукоятки. Так со снижением жесткости интегральное значение ошибки по скорости также снижается: $\int E_\omega = 1,4$ рад/с (для $c = 100$), $\int E_\omega = 1,29$ рад/с (для $c = 40$), $\int E_\omega = 1,28$ рад/с (для $c = 20$).

Выводы

С целью повышения эффективности функционирования испытательного стенда поворотного переключателя, яв-

ляющегося конструктивным элементом из состава органов управления экипажа самолета, были разработаны математический аппарат и методика численного моделирования. Разработанная математическая модель позволяет исследовать динамические особенности движения поворотного переключателя под действием крутящего момента приводной системы испытательного стенда. Особенностью модели является учет импульсного характера изменения крутящего момента на выходе шагового двигателя, используемого в оборудовании, моделирование нелинейного момента

сопротивления переключателя обусловлено наличием проходного упора, а также упруго-вязких свойств соединительной муфты, выполняющей роль сопряжения испытательного стенда и тестируемого оборудования.

В ходе моделирования были установлены: предельный момент сопротивления (1.72 Нм) и предельная скорость движения (65,4 об/мин) для приводной системы испытательного стенда. Разработанная модель позволила определить влияние упруго-вязкого элемента сопряжения испытательного стенда на точность движения исполнительного

звена поворотного переключателя. Так увеличение жесткости системы приводит к снижению интегральной квадратичной ошибки (до $0,4^\circ$), однако приводит к увеличению колебательности выражаемой квадратичной ошибкой по скорости. (до 1,4 рад/с). Для выбранных в работе параметров модели, численные расчеты позволили определить рациональные параметры вязкоупругого элемента ($c = 40$ Нм/рад, $b = 0.2$ Нмс/рад), позволяющие снизить интеграл ошибки по скорости до 1,29 рад/с, при сохранении высокой точности по углу поворота $= 0,67^\circ$ (0,74%).

Список литературы

1. Ахметшин Т. Ф. Сертификация авиационной техники // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18. №. 2 (63). С. 10-18.
2. Александровская Л. Н., Кузнецов А. Г., Солонников Ю. И. Анализ зарубежного опыта сертификации бортовых систем воздушных судов // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2010. №. 2. С. 36-51.
3. Буряченко А. Г., Ранченко Г. С. Испытательная база и методическое обеспечение испытаний ответственных изделий авиационной техники //Авиационно-космическая техника и технология. 2008. №. 4. С. 75-78.
4. Горбунов В. В., Новиков В. В., Карпеев А. М. Разработка стенда для испытания устройств автономного питания бортовых авиационных аппаратов на основе литий-ионных батарей // Автоматизация и управление в машино-и приборостроении. 2020. С. 14-17.
5. Лапердин А. И., Юркевич В. Д. Разработка адаптивного алгоритма управления стендом прочностных испытаний авиационных конструкций // Автометрия. 2017. Т. 53. №. 4. С. 51-58.
6. Мальчиков А. В., Яцун С. Ф., Яцун А. С. Математическое моделирование копирующего управления робототехническим устройством, оснащенным линейным электроприводом с упругим звеном // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. №. 5. С. 34-42.

7. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Adaptive Control System for DC Electric Drive under Uncertainty //2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2020. P. 1-5.
8. Investigation of the dynamical characteristics of the lower-limbs exoskeleton actuators / A. Yatsun, A. Karlov, A. Malchikov, S. Jatsun // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. Vol. 161. P. 03008.
9. Лушников Б. В., Котельников В. Я., Жакин А. И. Исследование динамики системы с сухим некулоновым трением при фрикционных автоколебаниях // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №. 1-2. С. 27-35.
10. Лушников Б. В. Испытательный стенд для идентификации динамических параметров сухого некулонова трения // Фундаментальные исследования. 2012. №. 3-3. С. 638-641.
11. High-performance nonlinear feedback control of a permanent magnet stepper motor / M. Bodson, J. N. Chiasson, R. T. Novotnak, R. B. Rekowski // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1993. Vol. 1. №. 1. P. 5-14.
12. Lyshevski S. E. Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics. CRC press, 2018. Т. 3.
13. Control features of the electromechanical system with end-effector considering the regulated torque / A. Malchikov, A. Yatsun, P. Bezmen, O. Tarasov // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. Т. 113. С. 02001.
14. Ricci S., Meacci V. Simple torque control method for hybrid stepper motors implemented in FPGA // Electronics. 2018. Vol. 7. №. 10. P. 242.
15. Huang Y. L. et al. Torque-sensorless control of stepper motors for low-cost compliant motion generation // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 94495-94504.
16. Денисов В. А., Жуков А. В. Математическое моделирование работы шагового двигателя в составе мехатронного модуля компенсации износа режущего инструмента // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 6-1. С. 54-58.
17. Степочкин А. О. Моделирование работы шагового электрического двигателя гибридного типа в пакете Simulink // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. №. 8. С. 308-315.
18. Моделирование электромеханического привода с гибридным шаговым двигателем роботизированной платформы / Л. А. Рыбак, Н. Н. Черкашин, А. А. Гунькин, А. В. Чичварин // Современные проблемы науки и образования. 2014. №. 6. С. 334-334.
19. Шмакова Ю. В. Математическое моделирование работы шагового двигателя в системе сканирования рентгенодифракционного прибора // Исследовано в России. 2000. Т. 3. С. 80-80.

20. Novel modeling and damping technique for hybrid stepper motor / K. W. H. Tsui, N. C. Cheung, K. C. W. Yuen // *IEEE transactions on industrial electronics*. 2008. Vol. 56. №. 1. P. 202-211.

References

1. Akhmetshin T. F. Sertifikatsiya aviacionnoj tekhniki [Certification of aviation equipment]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2014, vol. 18, no. 2 (63), pp. 10-18.

2. Alexandrovskaya L. N., Kuznetsov A. G., Solonnikov Yu. I. Analiz zarubezhnogo opyta sertifikatsii bortovykh sistem vozdukhnykh sudov [Analysis of foreign experience in certification of on-board aircraft systems]. *Trudy MIEA. Navigatsiya i upravlenie letatel'nyimi apparatami* = *Proceedings of the IEA. Navigation and Control of Aircraft*, 2010, no. 2, pp. 36-51.

3. Buryachenko A. G., Ranchenko G. S. Ispytatelnaya baza i metodicheskoe obespechenie ispytaniy otvetstvennykh izdelij aviacionnoj tekhniki [Test base and methodological support for testing critical products of aviation equipment]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* = *Aerospace Engineering and Technology*, 2008, no. 4, pp. 75-78.

4. Gorbunov V. V., Novikov V. V., Karpeev A.M. Razrabotka stenda dlya ispytaniya ustroystv avtonomnogo pitaniya bortovykh aviatsionnykh apparatov na osnove litiionnykh batarei [Development of a stand for testing devices for autonomous power supply of onboard aircraft based on lithium-ion batteries]. *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashino-i priborostroe-nii* = *Automation and Control in Machine and Instrument Engineering*, 2020, pp. 14-17.

5. Laperdin A. I., Yurkevich V. D. Razrabotka stenda dlya ispytaniya ustroystv avtonomnogo pitaniya bortovykh aviatsionnykh konstruktsiy [Development of an adaptive algorithm for controlling the stand of strength tests of aircraft structures]. *Avtometriya* = *Autometry*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 51-58.

6. Malchikov A.V., Jatsun S. F., Yatsun A. S. Matematicheskoe modelirovanie kopiruyushchego upravleniya robototekhnicheskim ustroystvom, osnashchennym lineinym elektroprivodom s uprugim zvenom [Mathematical modeling of copying control of a robotic device equipped with a linear electric drive with an elastic link]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* = *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*, 2019, no. 5, pp. 34-42.

7. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Adaptive Control System for DC Electric Drive under Uncertainty. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, IEEE, 2020, pp. 1-5.

8. Yatsun A., Karlov A., Malchikov A., Jatsun S. Investigation of the dynamical characteristics of the lower-limbs exoskeleton actuators. *MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*, 2018, vol. 161, 03008 p.

9. Lushnikov B. V., Kotelnikov V. Ya., Zhakin A. I. Research Of Dynamics Of System With The Dry Uncolomb Friction At Frictional Self-Oscillations [Investigation of the dynamics of a system with dry non-molecular friction under frictional self-oscillations]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2012, no. 1-2, pp. 27-35.
10. Lushnikov B. V. Ispytatel'nyi stand dlya identifikatsii dinamicheskikh parametrov sukhogo nekulonova treniya [Test bench for identification of dynamic parameters of dry non-coulomb friction]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2012, no. 3-3, pp. 638-641.
11. Bodson M., Chiasson J. N., Novotnak R. T., Rekowski R. B. High-performance non-linear feedback control of a permanent magnet stepper motor. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1993, vol. 1, no. 1, pp. 5-14.
12. Lyshevski S. E. *Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics*. CRC press, 2018, vol. 3.
13. Malchikov A., Yatsun A., Bezmen P., Tarasov O. Control features of the electromechanical system with end-effector considering the regulated torque. *MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*, 2017, vol. 113, 02001 p.
14. Ricci S., Meacci V. Simple torque control method for hybrid stepper motors implemented in FPGA. *Electronics*, 2018, vol. 7, no. 10, 242 p.
15. Huang Y. L. et al. Torque-sensorless control of stepper motors for low-cost compliant motion generation. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 94495-94504.
16. Denisov V. A., Zhukov A. V. Matematicheskoe modelirovanie raboty shagovogo dvigatelya v sostave mekhatronnogo modulya kompensatsii iznosa rezhushchego instrumenta [Mathematical modeling of the operation of a stepper motor as part of a mechatronic module for compensation of cutting tool wear]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 6-1, pp. 54-58.
17. Stepochnik A. O. Modelirovanie raboty shagovogo elektricheskogo dvigatelya gibridnogo tipa v pakete Simulink [Modeling the operation of a stepper electric motor of a hybrid type in the Simulink package]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical Science*, 2018, no. 8, pp. 308-315.
18. Rybak L. A., Cherkashin N. N., Gunkin A. A., Chichvarin A. V. Modelirovanie elektromekhanicheskogo privoda s gibridnym shagovym dvigatelem robotizirovannoi platformy [Modeling of an electromechanical drive with a hybrid stepper motor of a robotic platform]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 6, pp. 334-334.

19. Shmakova Yu. V. Matematicheskoe modelirovanie raboty shagovogo dvigatelya v sisteme skanirovaniya rentgenodifraktsionnogo pribora [Mathematical modeling of the operation of a stepper motor in the scanning system of an X-ray diffraction device]. *Issledovano v Rossii = Researched in Russia*, 2000, vol. 3, pp. 80-80.

20. Tsui K. W. H., Cheung N. C., Yuen K. C. W. Novel modeling and damping technique for hybrid stepper motor. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2008, vol. 56, no. 1, pp. 202-211.

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, ResearcherID G-3891-2017

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, ResearcherID G-3891-2017

Мальчиков Андрей Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknnp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>, ResearcherID N-8856-2016

Andrey V. Mal'chikov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zveroknnp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>, ResearcherID N-8856-2016

Яцун Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Andrey S. Yatsun, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Субботин Евгений Владимирович, аспирант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: subbo1299@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1528-1338>

Evgeniy V. Subbotin, Post-Graduate Student, Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: subbo1299@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1528-1338>