

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЕМОНСТРАТОРА ПОСАДОЧНОГО МОДУЛЯ С МНОГОКАМЕРНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

В.О. Чернецкий, *chernetckiivo@susu.ru*

В.Б. Садов, *sadovvb@susu.ru*

Е.А. Алёшин, *aleshinea@susu.ru*

В.С. Масыгин, *masiaginvs@susu.ru*

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В статье приводится подход к синтезу системы управления демонстратора, служащего для отработки алгоритмов управления летательного аппарата с многокамерной двигательной установкой. Использование подобных демонстраторов позволяет провести испытания отдельных узлов техники, оценить возможности применяемых технологий, разработать и проверить методики проектирования и определения требуемых параметров составных частей для получения в итоге нужных свойств изделия в целом. Целью работы являлся синтез модели демонстратора со сложной механической конструкцией, позволяющей осуществлять движение демонстратора на этапах взлета и посадки, с учетом характеристик механической части и двигательной установки демонстратора, алгоритмов его управления, характеристик используемых датчиков и регуляторов расхода горючего. В статье приводится вывод динамических уравнений движения частей демонстратора, основанный на использовании уравнений Лагранжа 2-го рода. Приведены структуры следящих систем демонстратора, даны подходы к синтезу регуляторов систем стабилизации с целью получения требуемых статических и динамических свойств системы управления. Показаны результаты моделирования движения демонстратора на этапе подъема и посадки. Моделирование производилось с использованием программной системы Simulink. Результаты цифрового моделирования движения демонстратора позволяют сделать вывод о возможности использования многокамерной двигательной установки с центральным телом для управления движением летательного аппарата без использования выделенных двигателей и механизмов ориентации. При этом управление ведется на основе регулирования подачи горючего и окислителя в группы камер двигательной установки. Весь материал статьи иллюстрирован необходимым объемом графического материала, приведены ссылки на литературные источники, подтверждающие возможность и качество использования тех или иных научных подходов и технологий.

Ключевые слова: система управления, цифровое моделирование, динамические уравнения движения, регуляторы, алгоритм управления, программная траектория движения

Благодарности. Работа выполнена в рамках договора FENU-2024-0004 (2024024ГЗ).

Для цитирования: Разработка модели системы управления демонстратора посадочного модуля с многокамерной двигательной установкой с центральным телом / В.О. Чернецкий, В.Б. Садов, Е.А. Алёшин, В.С. Масыгин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2025. Т. 25, № 4. С. 15–26. DOI: 10.14529/engin250402

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM MODEL FOR A DEMONSTRATOR LANDING MODULE WITH A MULTI-CHAMBER PROPULSION UNIT WITH A CENTRAL BODY

V.O. Chernetsky, *chernetkiivo@susu.ru*

V.B. Sadov, *sadovvb@susu.ru*

E.A. Aleshin, *aleshinea@susu.ru*

V.S. Masyagin, *masiaginv@susu.ru*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article presents an approach to the synthesis of a demonstrator control system used to test control algorithms for an aircraft with a multi-chamber propulsion system. The use of such demonstrators allows testing individual units of equipment, assessing the capabilities of the technologies used, developing and testing design methods and determining the required parameters of the components to ultimately obtain the desired properties of the product as a whole. The objective of the work was to synthesize a demonstrator model with a complex mechanical design that allows the demonstrator to move during takeoff and landing, taking into account the characteristics of the mechanical part and the demonstrator's propulsion system, its control algorithms, characteristics of the sensors and fuel flow regulators used. The article presents the derivation of dynamic equations of motion for the demonstrator parts based on the use of Lagrange equations of the second kind. The structures of the demonstrator's tracking systems are presented, approaches to the synthesis of stabilization system regulators are given in order to obtain the required static and dynamic properties of the control system. The results of modeling the demonstrator's motion during takeoff and landing are shown. The modeling was performed using the Simulink software system. The results of digital modeling of the demonstrator's motion allow us to conclude that it is possible to use a multi-chamber propulsion system with a central body to control the aircraft's motion without using dedicated engines and orientation mechanisms. In this case, control is based on regulating the supply of fuel and oxidizer to the groups of chambers of the propulsion system. The entire article is illustrated with the necessary amount of graphic material, and references to literary sources are provided that confirm the possibility and quality of using certain scientific approaches and technologies.

Keywords: control system, digital modeling, dynamic equations of motion, regulators, control algorithm, software trajectory of motion

Acknowledgments. The work was carried out under the contract FENU-2024-0004 (2024024Г3).

For citation: Chernetsky V.O., Sadov V.B., Aleshin E.A., Masyagin V.S. Development of a control system model for a demonstrator landing module with a multi-chamber propulsion unit with a central body. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2025;25(4):15–26. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin250402

Введение

В рамках проведения работ по грантам и государственным заданиям в вузе проводятся работы по созданию демонстраторов технологий, использующихся при создании образцов ракетно-космической и авиационной техники [1, 2]. Создание таких демонстраторов позволяет провести испытания отдельных узлов такой техники, оценить возможности применяемых технологий, разработать и проверить методики проектирования и определения требуемых параметров составных частей для получения в итоге нужных свойств изделия в целом.

Одной из задач по созданию демонстраторов является синтез систем управления для обеспечения заданного закона его движения. Типовым подходом к решению данной задачи является разработка модели системы управления, включая механическую, управляющую и датчиковую части; синтез требуемых регуляторов; моделирование системы с целью проверки динамических и статических ее характеристик.

1. Синтез модели демонстратора системы посадки

1.1. Механическая часть демонстратора

На рис. 1 показан общий вид механической части демонстратора с указанием углов поворота ее подвижных частей в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

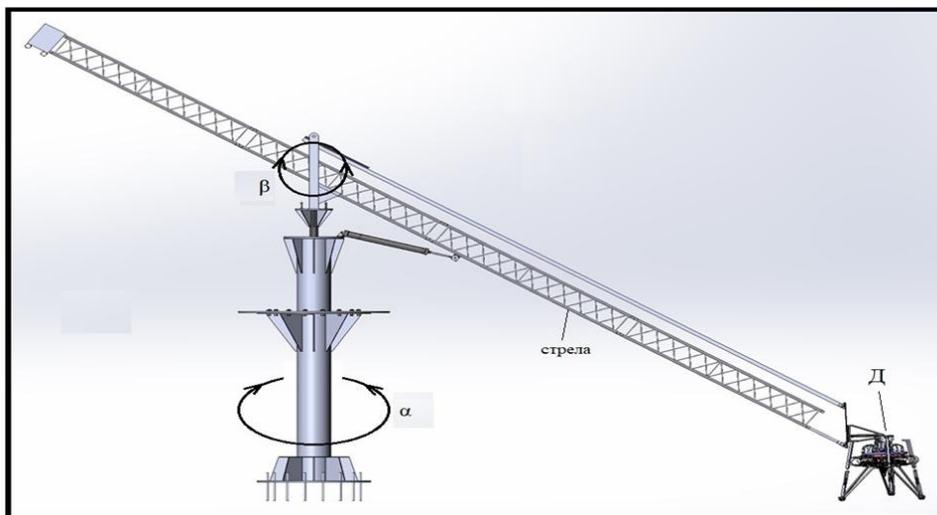


Рис. 1. Механическая часть демонстратора: Д – двигательная установка; α – поворот вращающейся части опоры стрелы (мачты) в горизонтальной плоскости; β – поворот стрелы в вертикальной плоскости

Fig. 1. Mechanical part of the demonstrator: Д – engine installation; α – rotation of the rotating part of the boom support (mast) in the horizontal plane; β – rotation of the boom in the vertical plane

На рис. 2 изображена кинематическая схема механической части демонстратора, на которой показаны основные геометрические параметры конструктивных элементов демонстратора и системы координат, используемые для получения динамических уравнений [3, 4].

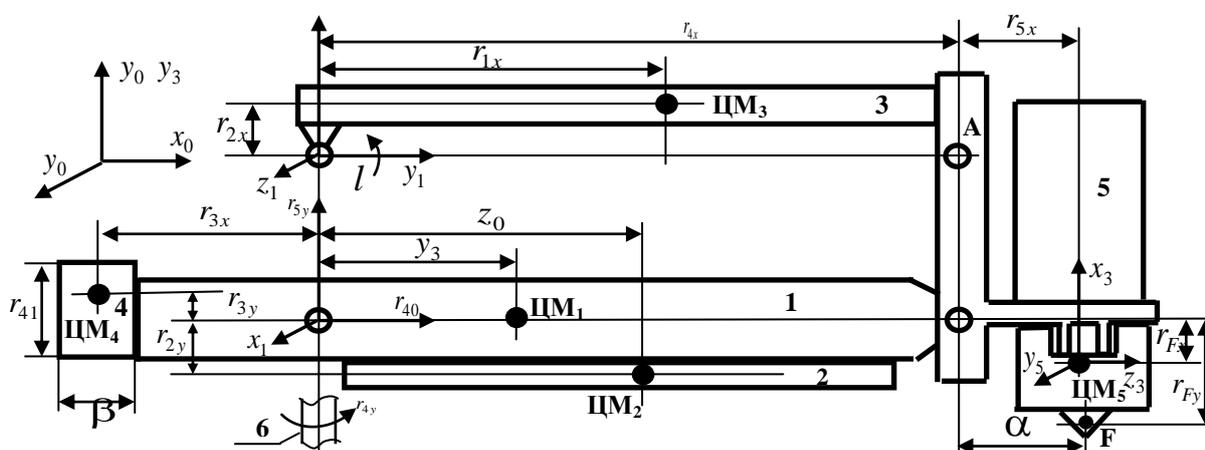


Рис. 2. Кинематическая схема демонстратора: 1 – стрела; 2 – трубопроводы и кабели; 3 – компенсатор; 4 – противовес; 5 – платформа, поворотный механизм, двигательная установка; 6 – вращающаяся часть опоры стрелы (мачты); ЦМ₁ – ЦМ₅ – центры масс; F – точка приложения силы тяги; $0x_0y_0z_0$ – неподвижная система координат; $0x_1y_1z_1$ – связанная со стрелой система координат; $0x_3y_3z_3$ – связанная с компенсатором система координат; $0x_5y_5z_5$ – связанная с платформой система координат

Fig. 2. Kinematic diagram of the demonstrator: 1 – boom; 2 – pipelines and cables; 3 – compensator; 4 – counterweight; 5 – platform, turning mechanism, propulsion system; 6 – rotating part of the boom support (mast); ЦМ₁ – ЦМ₅ – centers of mass; F – point of application of traction force; $0x_0y_0z_0$ – fixed coordinate system;

$0x_3y_3z_3$ – coordinate system associated with the compensator; $0x_5y_5z_5$ – coordinate system associated with the boom; $0x_0y_0z_0$ – coordinate system associated with the compensator; $0x_1y_1z_1$ – coordinate system associated with the platform

$0x_5y_5z_5$ – coordinate system associated with the boom; $0x_0y_0z_0$ – coordinate system associated with the compensator; $0x_1y_1z_1$ – coordinate system associated with the platform

Демонстратор состоит из большого числа движущихся элементов (см. рис. 2). Применяя уравнение Лагранжа 2-го рода [5, 6], получили динамические уравнения перемещения стрелы демонстратора в горизонтальной (на угол α) и вертикальной (на угол β) плоскости:

$$\ddot{\alpha} = \frac{1}{I'_\alpha} (M_\alpha - I'_c \dot{\alpha} \dot{\beta}) - M_{f\alpha} \operatorname{sign} \dot{\alpha}, \quad \ddot{\beta} = \frac{1}{I'_\beta} \left(M_\beta + \frac{1}{2} I'_c \dot{\alpha}^2 - M_g - M_{f\beta} \operatorname{sign} \dot{\beta} \right), \quad (1)$$

где

$$I'_\alpha = \sum_{i=1}^4 (I_{ix} \sin^2 \beta + I_{iy} \cos^2 \beta) + I_{5y} + I_{6y} + m_1 r_{1x}^2 \cos^2 \beta + m_2 (r_{2x} \cos \beta + r_{2y} \sin \beta)^2 + m_3 (r_{3x} \cos \beta - r_{3y} \sin \beta)^2 + m_4 (r_{4x} \cos \beta + r_{4y} \sin \beta)^2 + m_5 (l \cos \beta + r_{5x})^2, \quad (2)$$

$$I'_\beta = \sum_{i=1}^4 I_{iz} + m_1 r_{1x}^2 + \sum_{i=2}^4 m_i (r_{ix}^2 + r_{iy}^2) + m_5 l^2, \quad (3)$$

$$I'_c = \sum_{i=1}^4 (I_{ix} - I_{iy}) \sin 2\beta - m_1 r_{1x}^2 \sin 2\beta - \sum_{i=2}^4 m_i (r_{ix}^2 - r_{iy}^2) \sin 2\beta + 2(m_2 r_{2x} r_{2y} - m_3 r_{3x} r_{3y} + m_4 r_{4x} r_{4y}) \cos 2\beta - m_5 (l^2 \sin 2\beta + 2l r_{5x} \sin \beta), \quad (4)$$

$$M_g = m_1 g r_{1x} \cos \beta + m_2 g (r_{2x} \cos \beta + r_{2y} \sin \beta) + m_3 g (r_{3x} \cos \beta - r_{3y} \sin \beta) - m_4 g (r_{4x} \cos \beta + r_{4y} \sin \beta) + m_5 g l \cos \beta, \quad (5)$$

$$M_\alpha = -P_z (l \cos \beta + r_{Fx}), \quad M_\beta = P_{y0} l \cos \beta, \quad (6)$$

где P_z – проекция вектора тяги на ось Oz системы координат, связанной со стрелой (см. рис. 2); P_{y0} – проекция вектора тяги на ось Oy_0 неподвижной системы координат; $M_{f\alpha}$, $M_{f\beta}$ – моменты «сухого» трения в шарнирах и опоре стрелы.

Моменты M_α и M_β (6) создаются силами, плечи которых равны

$$l_{P\alpha} = l \cos(\beta) + r_{Fx}, \quad l_{P\beta} = l \cos(\beta). \quad (7)$$

Равновесие механической части демонстратора при различных значениях угла β обеспечивается проекцией силы тяги на ось Oy_0 неподвижной системы координат (см. рис. 2), которая равна

$$P_0 = M_g / l_{P\beta}. \quad (8)$$

Опираясь на выражения (1)–(8), можно применить типовой подход к исследованию систем управления, основанный на построении структурных схем [7, 8]. Структурная схема модели механической части демонстратора как объекта управления показана на рис. 3.

1.2. Модель двигательной установки

На рис. 4 показана многокамерная двигательная установка с центральным телом, содержащая 16 камер сгорания (КС), объединенных в 4 группы КС_I–КС_{IV}. Для управления отдельных групп камер сгорания предназначен свой клапан, который регулирует расход топлива. Все шестнадцать камер сгорания и все четыре управляющих клапана считаются одинаковыми.

При изменении управляющих токов клапанов в диапазоне $i_{\min} \leq i_k \leq i_{\max}$ сила тяги каждой группы камер сгорания меняется в диапазоне $P_{\min} \leq P_k \leq P_{\max}$, $k = I \dots IV$. Принято допущение об одинаковом изменении тяги отдельных групп камер сгорания от управляющих токов клапанов, поэтому $P_k(i_k) = P_{y0}(i)/4$, $k = I \dots IV$.

При моделировании перемещения демонстратора применялась полиномиальная интерполяция экспериментально полученной зависимости проекции общей силы тяги двигательной уста-

новки $P_{y0}(i)$ на вертикальную ось Oy_0 неподвижной системы координат от управляющего тока клапанов при одновременной работе всех четырех групп камер сгорания:

$$P_{y0}(i) = 6,77 + 7,18i - 4,25i^2 + 9,05 \cdot 10^{-2}i^3 \text{ (Н)}. \quad (9)$$

Также дополнительно приняты следующие допущения: шаговые двигатели перемещают золотники управляющих клапанов с постоянной скоростью, положение золотника прямо пропорционально зависит от управляющего тока клапана, время перемещения золотника из начального положения, которое соответствует току i_{\min} , в конечное положение, которое соответствует управляющему току i_{\max} , равно $T_{\text{кл}}$.

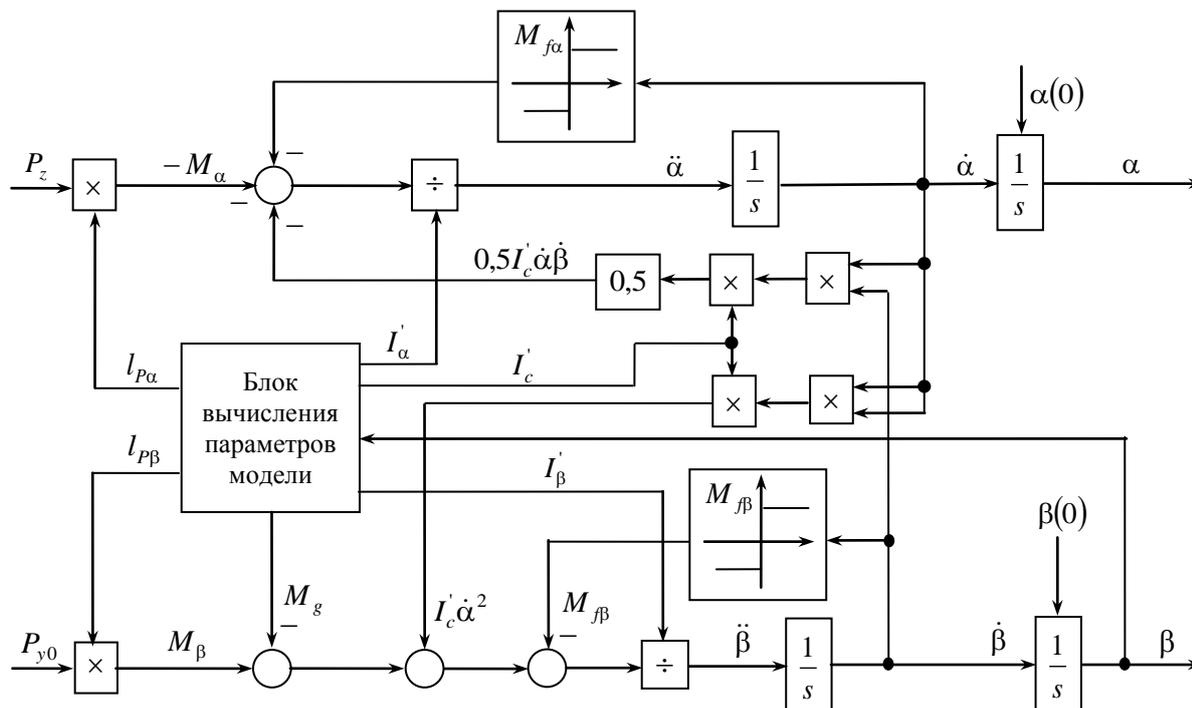


Рис. 3. Структурная схема модели механической части демонстратора как объекта управления при движении в горизонтальной (на угол α) и вертикальной (на угол β) плоскости

Fig. 3. Structural diagram of the model of the mechanical part of the demonstrator as a control object during movement in the horizontal (at an angle α) and vertical (at an angle β) planes

На все четыре управляющих клапана после запуска двигательной установки, но до начала перемещения демонстратора подаются такие равные управляющие токи $i_{\text{ном}}$, чтобы начальная тяга двигательной установки была немного меньше величины, рассчитанной по выражению (8).

Возможны два способа управления вектором тяги двигательной установки:

1) с помощью раздельного управления тягой (разנותяг) групп камер сгорания $КС_I$ – $КС_{IV}$ (при этом группы камер $КС_{II}$, $КС_{IV}$ всегда работают синхронно друг с другом, а группы камер $КС_I$, $КС_{III}$ могут работать независимо от других);

2) путем поворота двигательной установки с помощью рулевой машины на угол δ вокруг оси $O_5 x_5$ (см. рис. 2, 4) при одинаковом управлении всеми группами камер.

Первый вариант управления вектором тяги представляется наиболее перспективным, поэтому в дальнейшем будем рассматривать только его. В этом случае вертикальная составляющая силы тяги равна

$$P_{y0} = P_I + P_{II} + P_{III} + P_{IV}, \quad (10)$$

а горизонтальная составляющая силы тяги P_z будет зависеть от разности $P_{III} - P_I$. Будем полагать, что эта зависимость линейная:

$$P_z = K_{Pz} (P_{III} - P_I). \quad (11)$$

Таким образом, структурная схема двигательной установки будет иметь вид, представленный на рис. 5.

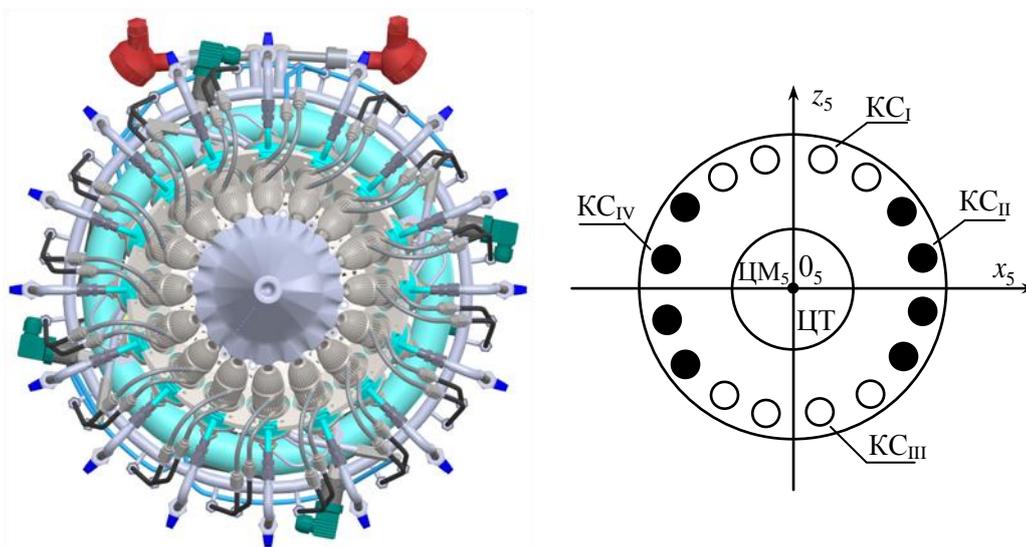


Рис. 4. Схема многокамерной двигательной установки с центральным телом (вид снизу)
Fig. 4. Schematic diagram of a multi-chamber propulsion system with a central body (bottom view)

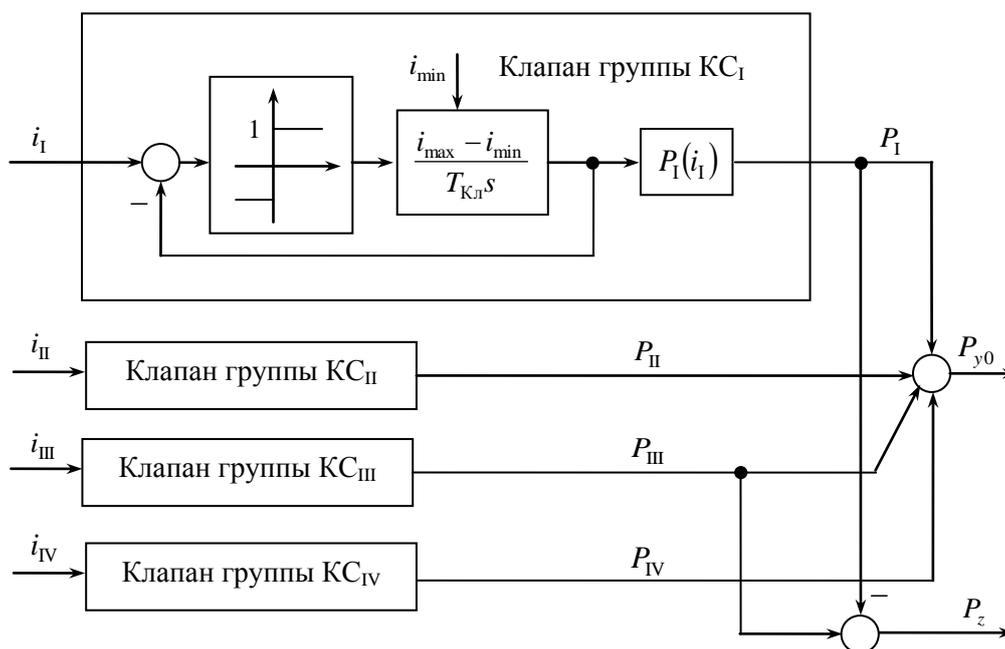


Рис. 5. Структурная схема модели двигательной установки при раздельном управлении группами камер сгорания
Fig. 5. Structural diagram of the propulsion system model with separate control of combustion chamber groups

1.3. Полная модель системы управления перемещением демонстратора

Объединение механической части демонстратора и многокамерной двигательной установки с центральным телом образует объект управления. Цифровые регуляторы каналов вертикального и горизонтального движения демонстратора, встроенные в бортовое вычислительное устройство

(БВУ), предназначены для управления токами $i_1 - i_{IV}$ клапанов групп камер сгорания КС_I–КС_{IV} (см. рис. 5) с целью реализации перемещения демонстратора по программным (заданным) траекториям в вертикальной и горизонтальной плоскости. Программные ($\alpha^{прг}$, $\beta^{прг}$) и фактические (α , β) значения углов поступают на вход регуляторов в цифровом виде. Через цифроаналоговые преобразователи код-ток на управляющие клапаны поступают рассчитанные значения управляющих токов. Таким образом, получаем структурную схему полной модели системы управления демонстратора, которая показана на рис. 6.

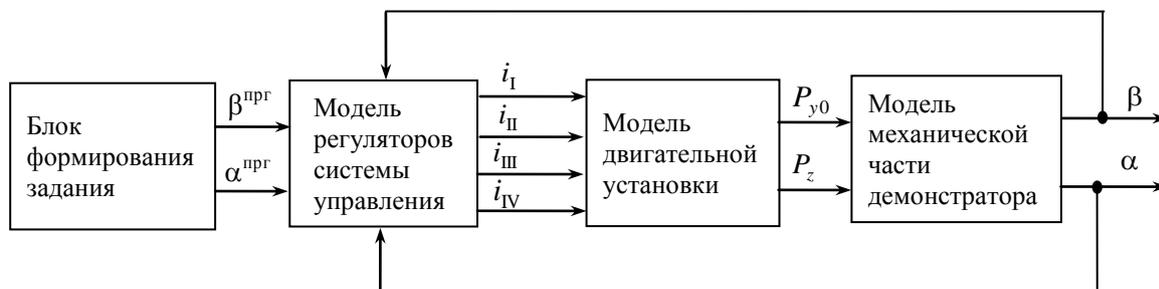


Рис. 6. Структурная схема полной модели системы управления перемещением демонстратора

Fig. 6. Block diagram of the complete model of the control system movement of the demonstrator

1.4. Модели цифровых регуляторов системы управления

В теории автоматического управления существует несколько типовых подходов для проектирования линейных [9, 10] и нелинейных [11, 12] цифровых корректирующих устройств (регуляторов) системы управления. В системе управления демонстратора используются линейные цифровые регуляторы с частотой дискретизации T_0 , что значительно облегчает их реализацию. Система управления демонстратора должна обладать устойчивостью в больших пределах изменения его параметров, движение демонстратора по программной траектории должно осуществляться так, чтобы в системе управления не было перерегулирования. Поэтому для придания системе управления данных свойств в качестве метода синтеза цифровых регуляторов выбран метод подчиненного регулирования [13, 14], позволяющий производить необходимую настройку их параметров. При управлении вектором тяги с помощью раздельного управления тягой групп камер сгорания КС_I–КС_{IV} модель регуляторов системы управления показана на рис. 7.

В бортовом вычислительном устройстве (в котором реализованы цифровые регуляторы) происходит обработка сигналов с импульсных датчиков угла (энкодеров), поэтому целесообразно объединить модели энкодеров с моделями регуляторов. Полученные при использовании энкодеров величины углов α и β будут квантованными с шагом квантования Δ_{α} .

Отдельные каналы системы управления демонстратора (каналы управления перемещением в вертикальной и горизонтальной плоскостях) являются двухконтурными следящими системами, коэффициенты усиления которых обозначены для внешних контуров по углу K_{α} и K_{β} и внутренних контуров по угловой скорости $K_{\dot{\alpha}}$ и $K_{\dot{\beta}}$ соответственно. Характерные особенности синтеза цифровых систем управления подробно рассмотрены в [15, 16].

Для того чтобы не нарушались условия ограничения по управляющим токам клапанов ($i_{\min} \leq i_k \leq i_{\max}$), рассчитанные в БВУ величины управляющих токов клапанов ограничиваются с последующим преобразованием в физические токи с помощью цифроаналоговых преобразователей код-ток, коэффициенты передачи которых K_{ic} .

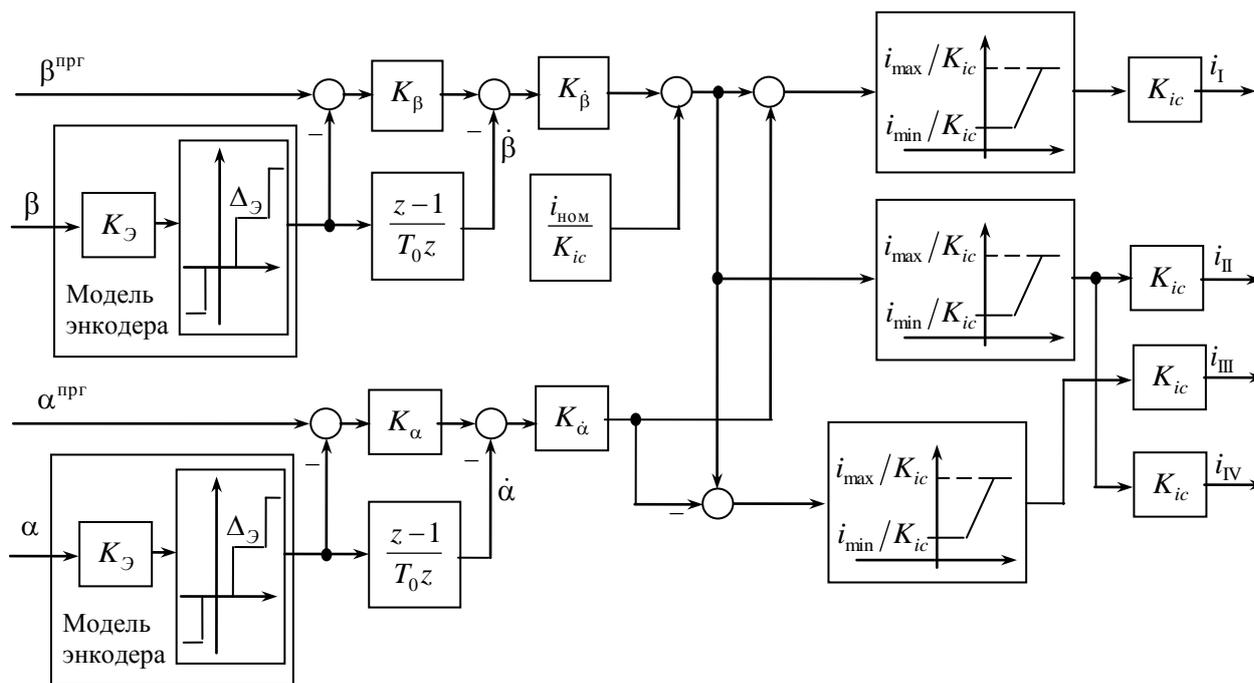


Рис. 7. Структурная схема моделей регуляторов системы управления демонстратора при раздельном управлении группами камер сгорания

Fig. 7. Structural diagram of the models of the demonstrator control system regulators with separate control of combustion chamber groups

2. Параметры модели системы управления демонстратора

Параметры модели механической части демонстратора (см. рис. 2, 3), входящие в выражения (1)–(8):

а) линейные размеры элементов (м):

$$r_{1x} = 2,962; r_{2x} = 4,226; r_{2y} = 0,158; r_{3x} = 3,491; r_{3y} = 0,052; r_{4x} = 4,531; r_{4y} = 0,011; r_{5x} = 0,632; r_{Fx} = 0,839; l = 8,548;$$

б) массы элементов (кг)

$$m_1 = 222; m_2 = 60; m_3 = 50; m_4 = 545,5; m_5 = 226;$$

в) центральные моменты инерции (кг·м²):

$$I_{1x} = 28,4; I_{1y} = 3078; I_{1z} = 3089; I_{2x} = 1,52; I_{2y} = 221,5; I_{2z} = 223; I_{3x} = 1,14; I_{3y} = 332,8; I_{3z} = 331,8; I_{4x} = 25,6; I_{4y} = 25,0; I_{4z} = 34,7; I_{5x} = 85,6; I_{5y} = 54,2; I_{5z} = 107,7; I_{6y} = 73,5;$$

г) моменты «сухого» трения в шарнирах и опоре стрелы (Нм):

$$M_{f\alpha} = 100; M_{f\beta} = 300;$$

д) начальное положение стрелы демонстратора:

$$\alpha(0) = 0^\circ, \beta(0) = -30^\circ.$$

Параметры модели двигательной установки (см. рис. 5):

а) минимальное и максимальное значение управляющих токов клапанов регулирования расходов топлива групп камер сгорания $i_{\min} = 8$ мА, $i_{\max} = 16$ мА;

б) минимальное и максимальное значения тяги каждой группы камер сгорания $P_{\min} = 12$ кгс, $P_{\max} = 20$ кгс;

в) время перемещения золотников клапанов из положения, соответствующего минимальному управляющему току, в положение, соответствующее максимальному управляющему току, и наоборот: $T_{\text{кл}} = 1,5$ с;

г) коэффициент $K_{pz} = 0,32$, входящий в (11);

д) минимальное и максимальное значения управляющего тока рулевой машины $i_{PM\min} = 8$ мА, $i_{PM\max} = 16$ мА.

Параметры моделей регуляторов системы управления (см. рис. 7):

- а) коэффициент передачи модели энкодеров $K_{\mathcal{O}} = 3437,75$;
- б) шаг квантования выходного сигнала модели энкодеров $\Delta_{\mathcal{O}} = 0,432$ угловых минут;
- в) коэффициент передачи преобразователей код-ток $K_{ic} = 0,01$;
- г) коэффициенты усиления $K_{\alpha} = 0,15$; $K_{\dot{\alpha}} = 15$; $K_{\beta} = 0,3$; $K_{\dot{\beta}} = 9$;
- д) период дискретизации цифровой системы управления $T_0 = 0,1$ с.

3. Результаты моделирования движения демонстратора

Для моделирования использовалась система Simulink [17, 18], входящая в базовую среду MATLAB [19, 20].

В процессе моделирования использовалась следующая программная траектория движения демонстратора: подъем стрелы в течение 10 с на угол 65° в вертикальной плоскости (рис. 8), поворот стрелы на угол 90° в горизонтальной плоскости (с одновременным удержанием ее в горизонте) в течение 25 с (рис. 9), опускание стрелы в течение 10 с (см. рис. 8). Результаты моделирования представлены на рис. 8–11.

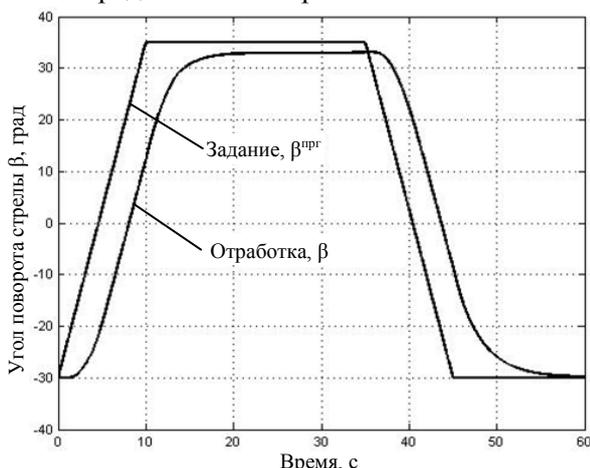


Рис. 8. Движение стрелы в вертикальной плоскости
Fig. 8. Movement of the boom in the vertical plane

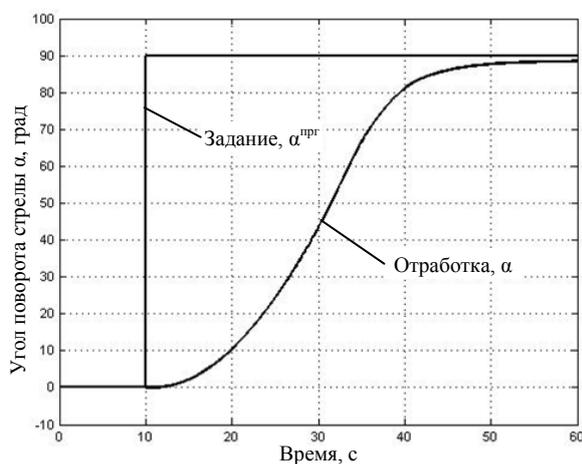


Рис. 9. Движение стрелы в горизонтальной плоскости
Fig. 9. Movement of the boom in the horizontal plane

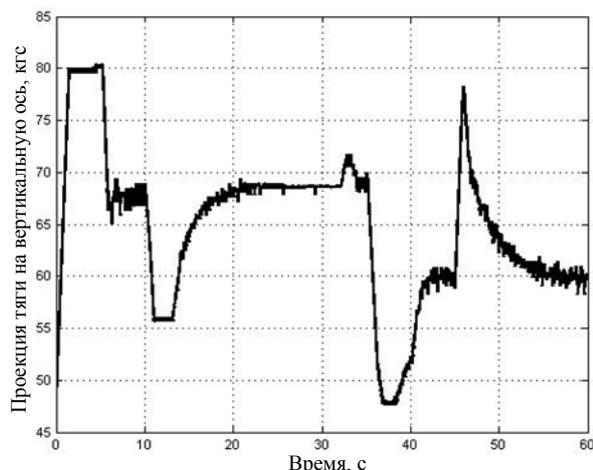


Рис. 10. Проекция вектора тяги двигательной установки на вертикальную ось
Fig. 10. Projection of the thrust vector of the propulsion system onto the vertical axis

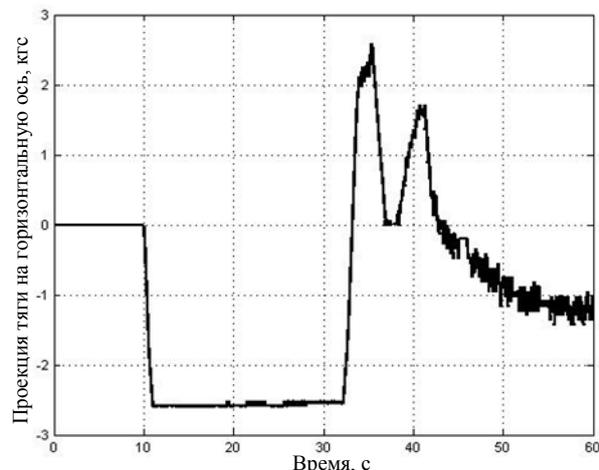


Рис. 11. Проекция вектора тяги двигательной установки на горизонтальную ось
Fig. 11. Projection of the thrust vector of the propulsion system onto the horizontal axis

Из анализа рис. 8–11 следует, что при обработке движения демонстратора по программной траектории перерегулирование отсутствует, установившаяся ошибка обработки угла в вертикальной плоскости в верхнем положении составляет порядка 3° , установившаяся ошибка обработки угла в горизонтальной плоскости не превышает 2° . Медленное движение демонстратора в горизонтальной плоскости (по сравнению с перемещением в вертикальной плоскости) объясняется малой величиной проекции вектора тяги на горизонтальную ось (см. рис. 11) и большими моментами инерции демонстратора. Таким образом, система управления обеспечивает необходимое качество движения демонстратора.

Выводы

В результате проведенных исследований разработана модель системы управления демонстратора системы посадки, которая позволяет осуществлять моделирование движения демонстратора по заданной траектории в вертикальной и горизонтальной плоскости. Данный подход позволяет вести обработку двигателей, алгоритмов управления и навигации летательного аппарата. При этом получены параметры регулятора системы управления, обеспечивающего качество движения платформы демонстратора по заданной программной траектории с приемлемыми статическими и динамическими погрешностями на различных ее участках.

Список литературы

1. Создание демонстратора технологии авиастроения / К.И. Сыпало, А.Л. Медведский, О.В. Бабичев и др. // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84545>.
2. Летательный аппарат – многоразовый лётный демонстратор: патент RU 186186U1 / А.И. Семёнов, Д.А. Кузнецов, А.А. Хомутов, И.А. Макаров. 2018.
3. Schaub H., Junkins J. L. *Analytical Mechanics of Space Systems*. AIAA, 2003. 600 p.
4. Витушкин В.В., Дубровина Г.И., Максимов Г.М. Уравнения Лагранжа второго рода. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. 63 с.
5. Амелькин Н.И. Курс аналитической механики. М.: Изд-во МФТИ, 2023. 298 с.
6. Faires V.M. *Analytical Mechanics*. 3rd ed. Macmillan, 2022. 424 p.
7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. М.: Профессия, 2004. 704 с.
8. Palani S. *Automatic Control Systems*. Springer, 2022. 908 p.
9. Лапин А.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. 124 с.
10. Antsaklis P.J., Michel A.N. *Linear Systems*. McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering. New York: McGraw-Hill, 1997. 324 p.
11. Лапин А.В. Теория автоматического управления. Нелинейные системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. 92 с.
12. Васильев Е.М., Коломыцев В.Г. Теория автоматического управления. Нелинейные системы: учебное пособие. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2011. 115 с.
13. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1992. 544 с.
14. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. 373 с.
15. Певзнер Л.Д. Цифровые системы управления. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2023. 241 с.
16. Landau I.D., Zito G. *Digital Control Systems: Identification, Design and Implementation*. Springer, 2006. 494 p.
17. Silage D. *Digital Communication Systems Using MATLAB and Simulink*. Bookstand Publishing, 2016.
18. Shailendra K.J. *Modeling and Simulation Using MATLAB–Simulink*. Wiley, 2016. 385 p.
19. Тимохин А.Н., Румянцев Ю.Д. Моделирование систем управления с применением MATLAB. М.: ИНФРА-М, 2024. 256 с.
20. Akan A., Chaparro L.F. *Signals and Systems Using MATLAB*. Academic Press, 2024. 848 p.

References

1. Sypalo K.I., Medvedskiy A.L., Babichev O.V., Kazarinov G.G., Kan A.V. Creation of an Aircraft Technology Demonstrator. *Proceedings of MAI*. 2017. No. 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84545>. (In Russ.)
2. Semenov A.I., Kuznetsov D.A., Khomutov A.A., Makarov I.A. *Letatel'nyy apparat – mnogorazovyy letnyy demonstrator* [The Aircraft Is a Reusable Flight Demonstrator]: Patent RF 186186U1. 2018.
3. Schaub H., Junkins J.L. *Analytical Mechanics of Space Systems*. Reston: AIAA, 2003. 600 p.
4. Vitushkin V.V., Dubrovina G.I., Maksimov G.M. *Uravneniya Lagranzha vtorogo roda* [Lagrange Equations of the Second Kind]. Moscow, 2024. 63 p.
5. Amel'kin N.I. *Kurs analiticheskoy mekhaniki* [Course of Analytical Mechanics]. Moscow, 2023. 298 p.
6. Faires V.M. *Analytical Mechanics*. 3rd ed. New York: Macmillan, 2022. 424 p.
7. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of Automatic Control Systems]. Moscow, 2004. 704 p.
8. Palani S. *Automatic Control Systems*. Berlin: Springer, 2022. 908 p.
9. Lapin A.V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Lineynye sistemy* [Theory of Automatic Control. Linear Systems]. Moscow, 2025. 124 p.
10. Antsaklis P.J., Michel A.N. *Linear Systems. McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering*. New York: McGraw-Hill, 1997. 324 p.
11. Lapin A.V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Nelineynye sistemy* [Theory of Automatic Control. Nonlinear Systems]. Moscow, 2024. 92 p.
12. Vasil'ev E.M., Kolomytsev V.G. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Nelineynye sistemy: uchebnoe posobie* [Theory of Automatic Control. Nonlinear Systems: Tutorial]. Perm, 2011. 115 p.
13. Il'inskiy N.F., Kozachenko V.F. *Obshchiy kurs elektroprivoda* [General Course of Electric Drive]. Moscow, 1992. 544 p.
14. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric Drive Control Systems]. Moscow, 2019. 373 p.
15. Pevzner L.D. *Tsifrovye sistemy upravleniya* [Digital Control Systems]. Moscow, 2023. 241 p.
16. Landau I.D., Zito G. *Digital Control Systems: Identification, Design and Implementation*. Berlin: Springer, 2006. 494 p.
17. Silage D. *Digital Communication Systems Using MATLAB and Simulink*. Bookstand Publishing, 2016.
18. Shailendra K.J. *Modeling and Simulation Using MATLAB–Simulink*. Hoboken: Wiley, 2016. 385 p.
19. Timokhin A.N., Rummyantsev Yu.D. *Modelirovanie sistem upravleniya s primeneniem MATLAB* [Modeling of Control Systems Using MATLAB]. Moscow, 2024. 256 p.
20. Akan A., Chaparro L.F. *Signals and Systems Using MATLAB*. Cambridge: Academic Press, 2024. 848 p.

Информация об авторах

Чернецкий Владимир Олегович, кандидат технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; chernetskiivo@susu.ru

Садов Виктор Борисович, кандидат технических наук, заведующий научной лабораторией «Системы управления летательными аппаратами», доцент кафедры «Системы автоматического управления», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; sadovvb@susu.ru

Алешин Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; aleshinea@susu.ru

Масыгин Владимир Станиславович, аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; masiaginvs@susu.ru

Information about the authors

Vladimir O. Chernetsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; chernetckiivo@susu.ru

Viktor B. Sadov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Scientific Laboratory for Aircraft Control Systems, Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; sadovvb@susu.ru

Evgeniy A. Aleshin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; aleshinea@susu.ru

Vladimir S. Masyagin, postgraduate student of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; masiaginvs@susu.ru

Статья поступила в редакцию 16.07.2025; принята к публикации 17.07.2025.

The article was submitted 16.07.2025; accepted for publication 17.07.2025