

УПРАВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ДЕМОНСТРАТОРА СИСТЕМЫ ПОСАДКИ

В.Б. Садов, *sadovvb@susu.ru*

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

Е.А. Алёшин, *aleshinea@susu.ru*

В.С. Масягин, *masiaginvs@susu.ru*

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В статье приводится подход к конструированию системы управления демонстратора, служащего для отработки двигателей, алгоритмов управления и навигации летательного аппарата на этапе посадки. 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. Механическая конструкция демонстратора представляет собой сложную систему из движущихся друг относительно друга частей. Основным подходом к синтезу систем управления подобными системами является цифровое моделирование. С этой целью в статье приводится вывод динамических уравнений движения частей демонстратора, основанных на использовании уравнений Лагранжа 2-го рода. При составлении модели также учитывались характеристики используемых ракетных двигателей, регуляторов расхода горючего, датчиков, синтезированных регуляторов и особенности цифровой реализации системы управления. Приведены результаты моделирования движения демонстратора на этапе подъема и посадки. Моделирование производилось с использованием программной системы Simulink. На этапе моделирования были определены параметры регулятора, обеспечивающего движение платформы ракетного двигателя по вертикали без перерегулирования с минимальной установившейся ошибкой отработки в верхнем положении. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о качестве движения демонстратора для реализации движения платформы демонстратора на этапах имитации взлета и посадки летательного аппарата. Весь материал статьи иллюстрирован необходимым графическим материалом, 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 за счет средств Гранта Министерства образования и науки Челябинской области от 25.12.2023 № 30-2023-010039 (договор 2023525).

Для цитирования: Управление вертикальным перемещением демонстратора системы посадки / В.Б. Садов, В.О. Чернецкий, Е.А. Алёшин, В.С. Масягин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2024. Т. 24, № 4. С. 32–43. DOI: 10.14529/engin240403

VERTICAL MOVEMENT CONTROL LANDING SYSTEM DEMONSTRATOR

V.B. Sadov, sadovvb@susu.ru
V.O. Chernetsky, chernetckiivo@susu.ru
E.A. Aleshin, aleshinea@susu.ru
V.S. Masyagin, masiaginvs@susu.ru
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article provides an approach to the design of the demonstrator control system, which serves to test the engines, control algorithms and navigation of the aircraft at the landing stage. The use of such demonstrators allows you to test individual components of equipment, evaluate the capabilities of the technologies used, develop and verify design techniques and determine the required parameters of the components to obtain the desired properties of the product as a whole. The mechanical design of the demonstrator is a complex system of moving parts relative to each other. The main approach to the synthesis of control systems of such systems is digital modeling. To this end, the article provides a derivation of the dynamic equations of motion of the demonstrator parts based on the use of Lagrange equations of the 2nd kind. When compiling the model, the characteristics of the rocket engines used, fuel consumption regulators, sensors, synthesized regulators and features of the digital implementation of the control system were also taken into account. The results of modeling the movement of the demonstrator at the stage of lifting and landing are presented. The simulation was performed using the Simulink software system. At the modeling stage, the parameters of the regulator were determined, which ensures the vertical movement of the rocket engine platform without overshooting with a minimum steady-state error in the upper position. The simulation results allow us to conclude about the quality of the demonstrator's movement for the implementation of the movement of the demonstrator platform at the stages of simulated takeoff and landing of an aircraft. The entire material of the article is illustrated with the necessary graphic material, references to literary sources confirming the possibility and quality of using certain scientific approaches and technologies are provided.

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

Acknowledgments: The study was carried out using funds from the Grant of the Ministry of Education and Science of the Chelyabinsk Region dated 12/25/2023 No. 30-2023-010039 (agreement 2023525)

For citation: Sadov V.B., Chernetskyi V.O., Aleshin E.A., Masyagin V.S. Vertical movement control landing system demonstrator. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2024;24(4):32–43. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin240403

Введение

В рамках проведения работ по грантам «Разработка демонстраторов водородных технологий полностью многоразовых перспективных ракет-носителей вертикального взлета и посадки» и «Технологические основы разработки беспилотных летательных аппаратов» проводятся работы по созданию демонстраторов технологий, использующихся при создании образцов ракетно-космической и авиационной техники. 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. Согласно классификации демонстраторов технологий [1, 2] рассматриваемый демонстратор системы посадки можно отнести к следующим классам: во-первых, к классу демонстраторов конструкции (как объекты, характеризующие способность материалов и элементов конструкции выполнять функции в пределах целей для данной ракетной конструкции и обладающие целым комплексом необходимых свойств); во-вторых, к классу летных демонстраторов (как демонстраторы ракетной техники для проведения испытаний в эксплуатационных условиях с целью подтверждения основных характеристик).

При проведении работ одной из основных задач по созданию демонстраторов являлось проектирование и изготовление системы управления для обеспечения заданного закона его движения. Типовым подходом к данной задаче является разработка модели системы управления, включающая механическую, управляющую и датчиковую части, синтез требуемых регуляторов, моделирование системы с целью проверки динамических и статических ее характеристик.

1. Разработка модели демонстратора

1.1. Модель механической части демонстратора

Кинематическая схема механической части демонстратора с указанием основных геометрических характеристик конструктивных элементов демонстратора, а также системами координат, которые необходимы для получения динамических уравнений [3, 4], показана на рис. 1.

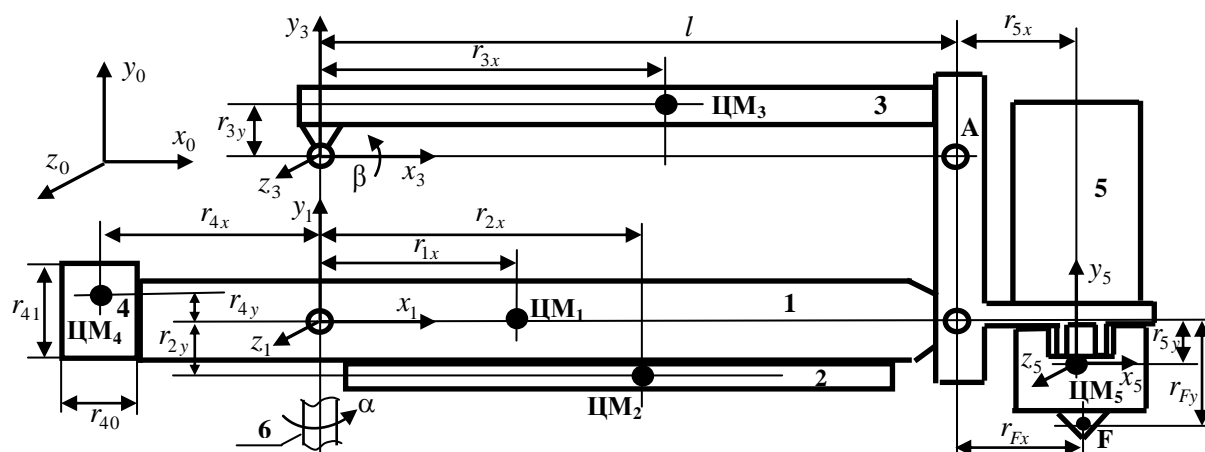


Рис. 1. Кинематическая схема демонстратора: 1 – стрела; 2 – трубопроводы и кабели; 3 – компенсатор; 4 – противовес; 5 – платформа, поворотный механизм, двигательная установка; 6 – вращающаяся часть опоры стрелы (мачты); ЦМ₁ – ЦМ₅ – центры масс; F – точка приложения силы тяги; 0x₀y₀z₀ – неподвижная система координат; 0x₁y₁z₁ – связанная со стрелой система координат; 0x₃y₃z₃ – связанная с компенсатором система координат; 0x₅y₅z₅ – связанная с платформой система координат

Fig. 1. 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); CM₁ – CM₅ – centers of mass; F – point of application of traction force; 0x₀y₀z₀ – fixed coordinate system; 0x₁y₁z₁ – coordinate system associated with the boom; 0x₃y₃z₃ – coordinate system associated with the compensator; 0x₅y₅z₅ – coordinate system associated with the platform

Как видно из рис. 1, демонстратор состоит из большого числа основных движущихся частей, поэтому для получения его динамических уравнений целесообразно использовать уравнение Лагранжа 2-го рода [5, 6]. В результате может быть получено следующее динамическое уравнение перемещения стрелы демонстратора в вертикальной плоскости на угол β :

$$\ddot{\beta} = \frac{1}{I_{\beta}} (M_{\beta} - M_g - M_{f\beta} \operatorname{sign} \dot{\beta}), \quad (1)$$

где

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

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

$$M_{\beta} = P_{y0} l \cos \beta, \quad (4)$$

P_{y0} – проекция вектора тяги на ось Oy_0 неподвижной системы координат; $M_{f\beta}$ – момент «сухого» трения в шарнире стрелы.

Как видно из (4), плечо силы, создающей момент M_β , равно

$$l_{p\beta} = l \cos \beta. \quad (5)$$

Проекция силы тяги на ось Oy_0 , обеспечивающая равновесие конструкции при различных значениях угла вертикального перемещения β , имеет значение

$$P_0 = \frac{M_g}{l_{p\beta}}. \quad (6)$$

В теории регулирования типичным подходом к анализу динамических систем является построение структурных схем систем управления [7, 8].

На основании уравнения (1) с учетом (2)–(6) может быть построена структурная схема модели механической части демонстратора как объекта управления при перемещении в вертикальной плоскости, которая представлена на рис. 2.

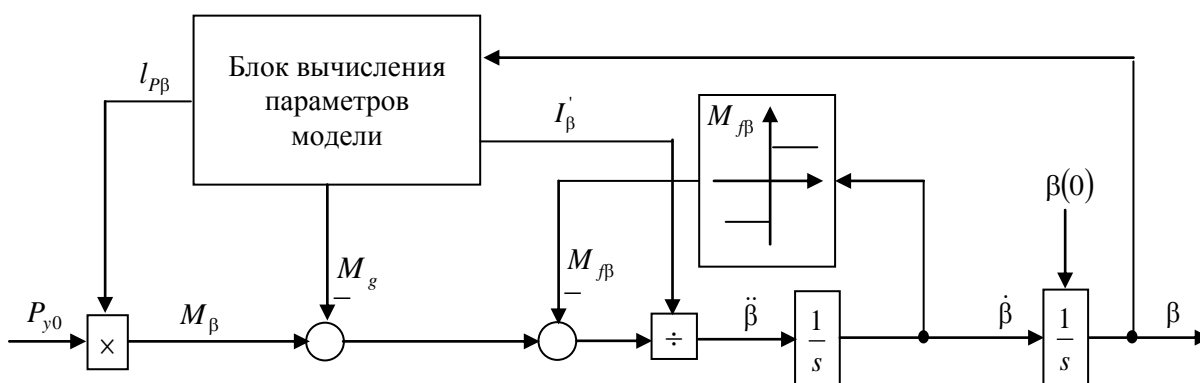
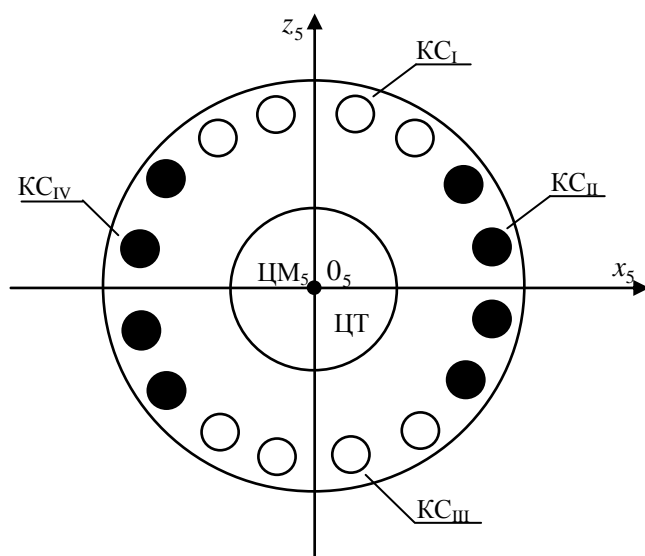


Рис. 2. Структурная схема модели механической части демонстратора как объекта управления при движении в вертикальной плоскости на угол β

Fig. 2. Block diagram of the model of the mechanical part of the demonstrator as a control object when moving in a vertical plane at an angle β

1.2. Модель двигательной установки

Двигательная установка с центральным телом имеет 16 камер сгорания (КС), объединенных в 4 группы $KC_I - KC_{IV}$, что показано на рис. 3.



Каждая группа камер сгорания управляется отдельным клапаном, регулирующим расход топлива. Все камеры сгорания и клапаны одинаковы.

Управляющие токи клапанов изменяются в диапазоне

$$i_{\min} \leq i_k \leq i_{\max}, \quad k = I...IV, \quad (7)$$

при этом сила тяги каждой группы изменяется в диапазоне

$$P_{\min} \leq P_k \leq P_{\max}, \quad k = I...IV. \quad (8)$$

Рис. 3. Схема двигательной установки с центральным телом (вид снизу)

Fig. 3. Diagram of a propulsion system with a central body (bottom view)

Полученная экспериментально зависимость вертикальной составляющей силы тяги двигательной установки от управляющего тока клапанов при совместной работе всех групп камер сгорания представлена на рис. 4.

Как видно из рис. 4, зависимость тяги от тока существенно нелинейная. Поэтому при моделировании использовалась полиномиальная интерполяция

$$P_{y0}(i) = 6,94 + 7,30i - 4,32 \cdot 10^{-1}i^2 + 9,20 \cdot 10^{-3}i^3 \text{ (кгс)}$$

или

$$P_{y0}(i) = 6,77 \cdot 10^1 + 7,18 \cdot 10^1 i - 4,25i^2 + 9,05 \cdot 10^{-2}i^3 \text{ (Н)}. \quad (9)$$

Зависимости тяги отдельных групп камер от управляющих токов экспериментально не определялись, поэтому было принято допущение, что они одинаковые и имеют вид

$$P_k(i_k) = \frac{P_{y0}(i)}{4}, \quad k = \text{I} \dots \text{IV}. \quad (10)$$

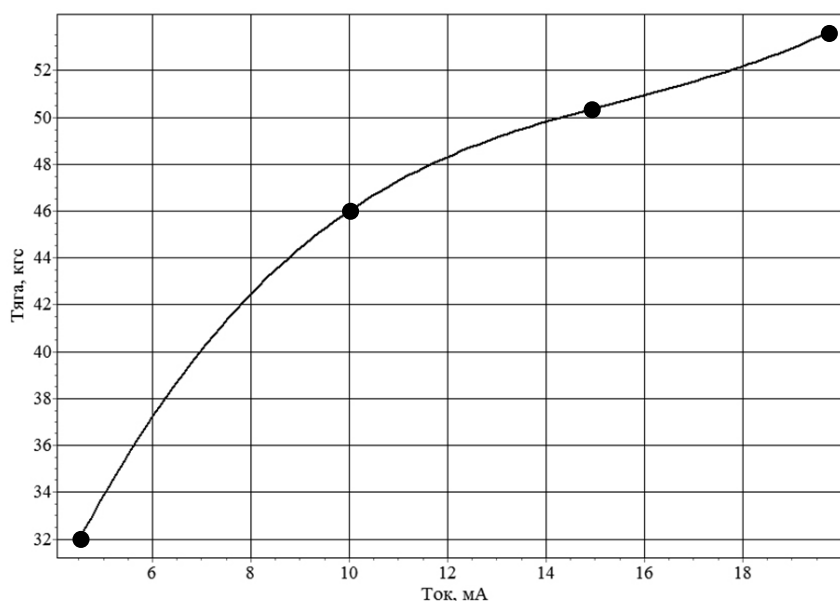


Рис. 4. Зависимость вертикальной составляющей силы тяги от управляющего тока клапанов

Fig. 4. Dependence of the vertical component of the traction force on the control current of the valves

Будем считать, что золотники клапанов перемещаются шаговыми двигателями с постоянной скоростью, положение золотника линейно зависит от управляющего тока и время перемещения из положения, соответствующего току i_{\min} , в положение, соответствующее току i_{\max} , равно $T_{\text{кл}}$.

После запуска двигательной установки до начала движения демонстратора на все клапаны должны быть поданы одинаковые управляющие токи $i_{\text{ном}}$ для того, чтобы тяга двигательной установки была незначительно меньше величины P_0 , определяемой (6).

При перемещении демонстратора только в вертикальной плоскости управление тягой двигательной установки осуществляется одновременным управлением тягой всех групп камер сгорания $\text{КС}_\text{I} - \text{КС}_\text{IV}$, управляющие токи клапанов одинаковы и изменяются синхронно: $i_\text{I} = i_\text{II} = i_\text{III} = i_\text{IV}$. Поэтому вертикальная составляющая силы тяги равна

$$P_{y0} = P_\text{I} + P_\text{II} + P_\text{III} + P_\text{IV}. \quad (11)$$

В результате структурная схема модели двигательной установки будет иметь вид, представленный на рис. 5.

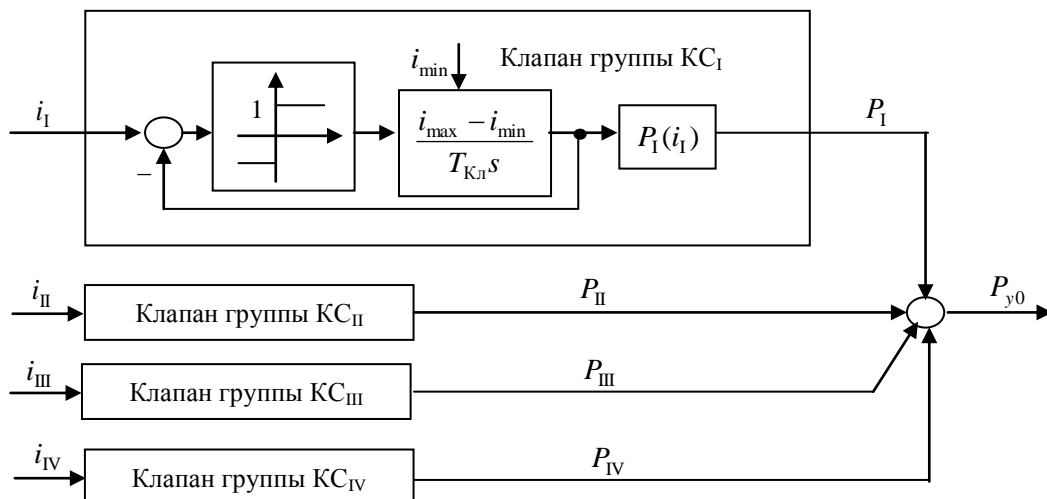


Рис. 5. Структурная схема модели двигательной установки при синхронном управлении группами камер сгорания
Fig. 5. Block diagram of a propulsion system model with synchronous control of groups of combustion chambers

1.3. Полная модель системы управления вертикальным перемещением демонстратора

Механическая часть демонстратора совместно с двигательной установкой составляют объект управления. Для того чтобы обеспечить движение демонстратора по заданной траектории только в вертикальной плоскости, необходимо синхронно управлять токами клапанов $i_1 - i_{iv}$. Для этого используются регуляторы системы управления, реализованные в цифровом виде в бортовом вычислительном устройстве. На вход регуляторов поступает программное значение угла и β^{Pr} , а также фактическое значение угла β . Вычисленные значения управляющих токов поступают на клапаны через преобразователь код – ток. В результате структурная схема полной модели имеет вид, представленный на рис. 6.



Рис. 6. Структурная схема полной модели системы управления вертикальным перемещением демонстратора
Fig. 6. Block diagram of the complete model of the control system vertical movement of the Demonstrator

1.4. Модель регулятора системы управления

Существует несколько подходов для синтеза как линейных [9, 10], так и нелинейных корректирующих устройств системы управления [11, 12]. Регулятор системы управления демонстратора для простоты реализации был выбран линейным и синтезировался по методу подчиненного регулирования [13, 14], который позволяет осуществить настройку параметров регулятора так, чтобы в системе управления отсутствовало перерегулирование, что крайне важно при движении демонстратора по заданной траектории, и обеспечивает устойчивость системы в широких пределах изменения его характеристик.

Поскольку в демонстраторе используется импульсный датчик угла (энкодер), обработка сигналов с которого выполняется в том же вычислительном устройстве, в котором реализуется сам регулятор, модель энкодера включена в состав модели регулятора. Значение угла, полученного при использовании энкодера, является квантованным с шагом квантования Δ_γ .

В случае синхронного управления тягой групп камер сгорания $KC_I - KC_{IV}$ только для вертикального перемещения демонстратора модель регуляторов системы управления имеет вид, представленный на рис. 7.

Регулятор является одноканальным (канал управления перемещением в вертикальной плоскостях). Канал системы управления представляет собой двухконтурную следящую систему с коэффициентами усиления внешнего контура K_β и внутреннего контура $K_{\dot{\beta}}$ соответственно, которые определяются по методу подчиненного регулирования.

Синтез цифровых систем управления и их характерные особенности подробно описываются в [15, 16].

Частота дискретизации цифрового регулятора имеет значение T_0 . Вычисленные значения управляющих токов клапанов ограничиваются (для того чтобы не нарушалось условие (7)) и преобразуются в физические токи с помощью преобразователей код – ток с коэффициентами передачи K_{ic} .

2. Параметры модели демонстратора

2.1. Параметры модели механической части демонстратора

При моделировании использовались следующие параметры механической части демонстратора (см. рис. 1), входящие в формулы (1)–(6):

а) линейные размеры (м)

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

б) массы (кг)

$$m_1 = 222; \quad m_2 = 60; \quad m_3 = 50; \quad m_4 = 469; \quad m_5 = 166;$$

в) центральные моменты инерции (кг·м²)

$$I_{1x} = 28,4; \quad I_{1y} = 3078; \quad I_{1z} = 3089; \quad I_{2x} = 1,52; \quad I_{2y} = 221,5; \quad I_{2z} = 223; \quad I_{3x} = 1,14; \quad I_{3y} = 332,8; \\ I_{3z} = 331,8; \quad I_{4x} = 22,0; \quad I_{4y} = 21,5; \quad I_{4z} = 29,8; \quad I_{5x} = 62,9; \quad I_{5y} = 39,8; \quad I_{5z} = 79,1; \quad I_{6y} = 73,5;$$

г) момент трения $M_{\beta\beta} = 300 \text{ Нм}$;

д) начальное значение угла поворота стрелы в вертикальной плоскости $\beta(0) = -22^\circ$.

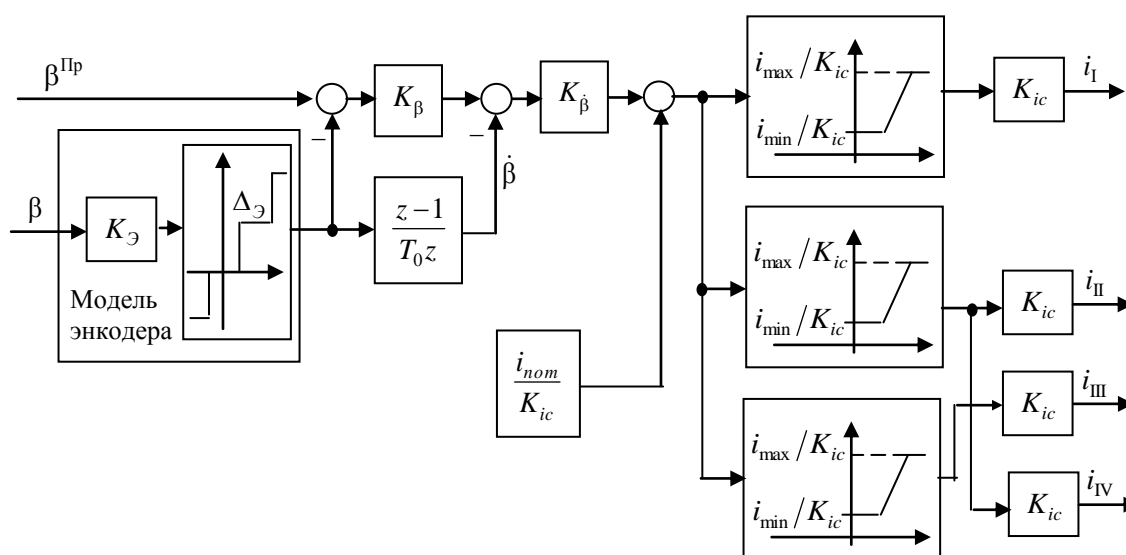


Рис. 7. Структурная схема модели регулятора системы управления при синхронном управлении группами камер сгорания
Fig. 7. Block diagram of the control system regulator model with synchronous control of groups of combustion chambers

2.2. Параметры модели двигательной установки

Одной из задач моделирования являлось подтверждение возможности управления движением демонстратора при параметрах двигательной установки, заложенных в техническое задание на ее разработку.

Для моделирования использовалась система Simulink [17, 18] и базовая система MATLAB [19, 20].

При моделировании использовались следующие параметры, входящие в (7)–(10):

– минимальное и максимальное значение управляющих токов клапанов регулирования расходов топлива групп камер сгорания:

$$i_{\min} = 4,5 \text{ мА}; i_{\max} = 19,8 \text{ мА}; \quad (12)$$

– минимальное и максимальное значение тяги каждой группы камер сгорания:

$$P_{\min} = 7,97 \text{ кгс}; P_{\max} = 13,38 \text{ кгс}; \quad (13)$$

– время перемещения золотников клапанов из положения, соответствующего минимальному управляющему току в положение, соответствующее максимальному управляющему току и наоборот:

$$T_{\text{Кл}} = 1,5 \text{ с}. \quad (14)$$

2.3. Параметры модели регулятора системы управления

В цифровой системе управления все угловые величины задаются в угловых минутах, а угол поворота стрелы демонстратора β в модели механической части демонстратора (см. рис. 2) выражается в радианах. Поэтому коэффициент передачи модели энкодера (см. рис. 7) имеет значение

$$K_{\vartheta} = \frac{180 \cdot 60}{\pi} = 3437,75. \quad (15)$$

Используемый в демонстраторе энкодер вырабатывают 2000 импульсов на один оборот вала, и он установлен после повышающего редуктора с коэффициентом передачи 10. Поэтому шаг квантования выходного сигнала модели энкодера (см. рис. 7) составляет (в угловых минутах)

$$\Delta_{\vartheta} = \frac{360 \cdot 60}{2000 \cdot 10} = 1,08. \quad (16)$$

В системе управления используются преобразователи код – ток, в которых диапазону входного тока 0–2000 соответствует диапазон выходного тока 0–20 мА. Поэтому коэффициент передачи преобразователей K_{ic} (см. рис. 7) равен

$$K_{ic} = 0,01. \quad (17)$$

Коэффициенты усиления K_{β} , $K_{\dot{\beta}}$ выбраны таким образом, чтобы при отработке программного значения угла $\beta^{\text{Пр}}$ отсутствовало перерегулирование. При этом

$$K_{\beta} = 0,3; K_{\dot{\beta}} = 8. \quad (18)$$

Период дискретизации цифровой системы управления

$$T_0 = 0,1 \text{ с}. \quad (19)$$

3. Результаты моделирования движения демонстратора в вертикальной плоскости

В процессе моделирования использовалась следующая программная траектория поворота стрелы демонстратора в вертикальной плоскости ($\beta^{\text{Пр}}$, рис. 8, 12): подъем стрелы в течение 10 с на заданный угол (30° или 50°), удержание стрелы в течение 15 с, опускание стрелы в исходное положение в течение 10 с. Результаты моделирования представлены на рис. 8–15.

3.1. Поворот стрелы на угол 30°

Как видно из рис. 8–11, при отработке движения демонстратора в вертикальной плоскости по программной траектории $\beta^{\text{Пр}}$ на угол 30° перерегулирование отсутствует, установившаяся ошибка отработки угла в верхнем положении составляет порядка 2° , управляющие токи клапанов и тяга двигательной установки не достигают своих минимальных и максимальных значений.

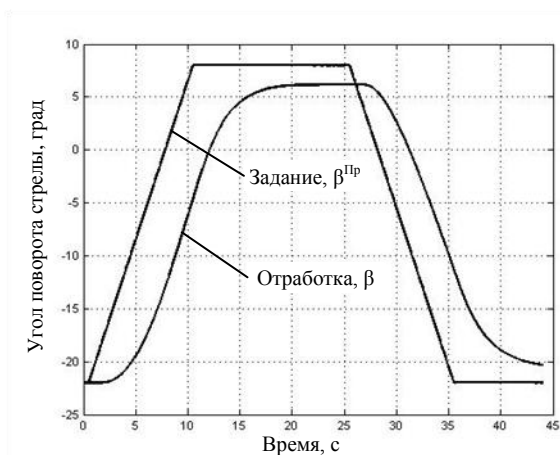


Рис. 8. Поворот стрелы на угол 30°
Fig. 8. Rotate the boom at an angle of 30°

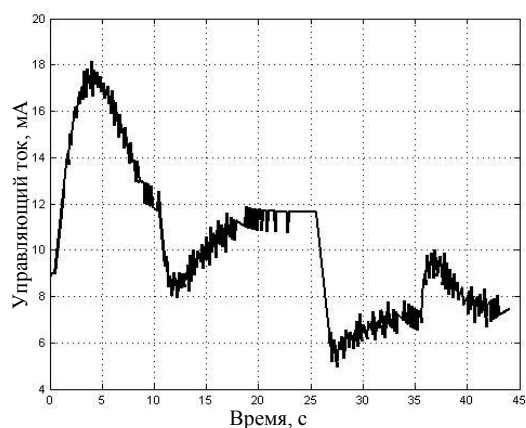


Рис. 9. Управляющий ток клапанов
Fig. 9. Valve control current

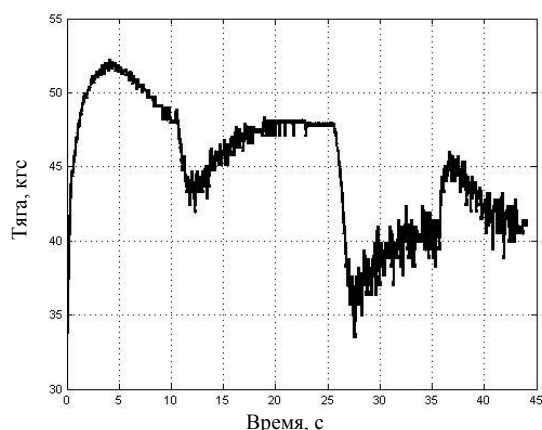


Рис. 10. Тяга двигательной установки
Fig. 10. Propulsion system thrust

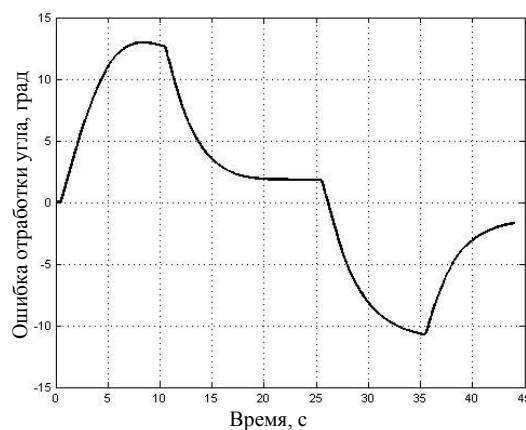


Рис. 11. Ошибка отработки угла поворота стрелы в вертикальной плоскости
Fig. 11. Error in working out the angle of rotation of the boom in the vertical plane

3.2. Поворот стрелы на угол 50°

Как видно из рис. 12–15, при отработке движения демонстратора в вертикальной плоскости с поворотом стрелы на угол 50° перерегулирование отсутствует, установившаяся ошибка отработки угла в верхнем положении составляет порядка 2°, управляющие токи клапанов и тяга двигательной установки входят в зоны насыщения (достигают своих минимальных и максимальных значений на некоторых участках программной траектории).

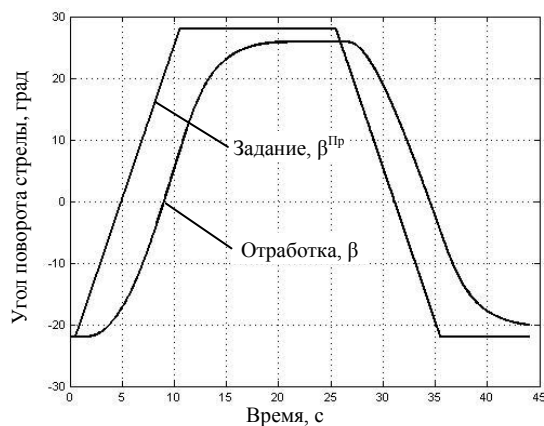


Рис. 12. Поворот стрелы на угол 50°
Fig. 12. Rotate the boom at an angle of 50°

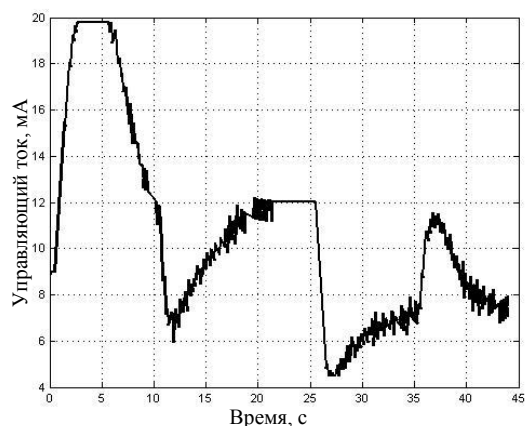


Рис. 13. Управляющий ток клапанов
Fig. 13. Valve control current

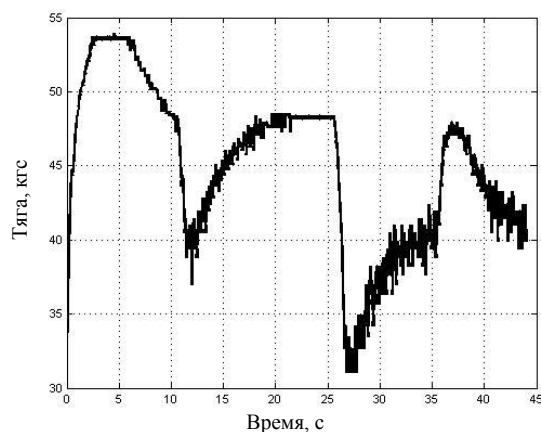


Рис. 14. Тяга двигательной установки
Fig. 14. Propulsion system thrust

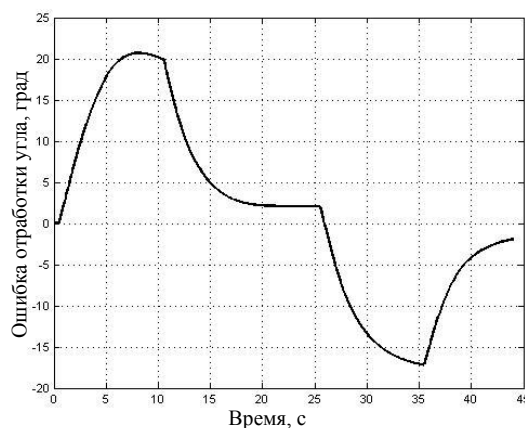


Рис. 15. Ошибка отработки угла поворота
стрелы в вертикальной плоскости
Fig. 15. Error in working out the angle
of rotation of the boom in the vertical plane

Выводы

В результате проведенных исследований разработана модель системы управления демонстратора системы посадки, которая позволяет осуществлять моделирование движения демонстратора в вертикальной плоскости по заданной траектории. Данный подход позволяет вести отработку 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, Г.Г. Казаринов, А.В. Кан // Труды МАИ, 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84545>.
2. Семенов А.И., Кузнецов Д.А., Хомутов А.А., Макаров И.А. Летательный аппарат – много-разовый летный демонстратор. Патент RU 186186U1, 2018.
3. Louis N.H., Janet D.F. Analytical Mechanics. Cambridge University Press, 1998. 592 p.
4. Медведев Б.В. Начала теоретической физики. Механика, теория поля, элементы квантовой механики. М.: Физматлит, 2007. 600 с.
5. Мусалимов В.М., Сергушин П.А. Аналитическая механика. Уравнение Лагранжа второго рода. Свободные колебания. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 53 с.
6. Goldstein H., Poole C.P., Safko J.L. Classical Mechanics (3rd Edition). Addison-Wesley: 2002, 638 p.
7. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник для вузов: в 5 т. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов, А.И. Баркин и др.; под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 654 с.
8. Benjamin C.K. Automatic control systems. Prentice-Hall, 1995. 800 p.
9. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1: Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 288 с.
10. Chen C.-T. Linear system theory and design (the Oxford series in electrical and computer engineering). Oxford university press, 2012. 400 p.
11. Лурье Б.Я., Экрайт П.Дж. Классические методы автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 640 с.
12. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2: Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 464 с.
13. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.

14. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для студентов вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 304 с.
15. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. М.: Мир, Машиностроение, 1986. 448 с.
16. Houppis C.H., Lamont G.B. Digital control systems: theory, hardware, software. McGraw-Hill, 1992.
17. Levesque A.H., Giordano A.A. Modeling of digital communication systems using SIMULINK. John Wiley & Sons Limited, 2018. 352 p.
18. Dingyü X., YangQuan C. System simulation techniques with MATLAB and Simulink. Wiley, 2018. 485 p.
19. Дьяконов, В. MATLAB 6: Учебный курс. СПб., Питер, 2001. 592 с.
20. Jongrae K. Dynamic system modeling and analysis with MATLAB and Python: for control engineers. Wiley-IEEE Press, 2022. 336 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>.
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. Louis N.H., Janet D.F. *Analytical Mechanics*. Cambridge University Press, 1998. 592 p.
4. Medvedev B.V. *Nachala teoreticheskoy fiziki. Mekhanika, teoriya polya, elementy kvantovoy mekhaniki* [The beginnings of theoretical physics. Mechanics, field theory, elements of quantum mechanics]. Moscow, 2007. 600 p.
5. Musalimov V.M., Sergushin P.A. *Analiticheskaya mekhanika. Uravnenie Lagranzha vtorogo roda. Svobodnye kolebaniya* [Analytical mechanics. Lagrange equation of the second kind. Free vibrations]. St. Petersburg, 2007. 53 p.
6. Goldstein H., Poole C.P., Safko J.L. *Classical Mechanics* (3rd Edition). Addison-Wesley, 2002. 638 p.
7. Pupkov K.A., Egupov N.D., Barkin A.I. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 1: Matematicheskie modeli, dinamicheskie kharakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern theory of automatic control. Volume 1: Mathematical models, dynamic characteristics and analysis of automatic control systems]. Moscow, 2004. 654 p.
8. Benjamin C.K. *Automatic control systems*. Prentice-Hall, 1995. 800 p.
9. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Lineynye sistemy* [Theory of automatic control. Vol. 1. Linear systems]. Moscow, 2003. 288 p.
10. Chen C.-T. *Linear system theory and design* (the Oxford series in electrical and computer engineering). Oxford university press, 2012. 400 p.
11. Lurie B.Ya., Ekraiy P.Dzh. *Klassicheskie metody avtomaticheskogo upravleniya* [Classic automatic control methods]. St. Petersburg, 2004. 640 p.
12. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 2. Mnogomernye, nelineynye, optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Theory of automatic control. Vol. 2. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems]. Moscow, 2004. 464 p.
13. Chilikin M.G., Sandler A.S. *Obshchiy kurs elektropivoda* [General electric drive course]. Moscow, 1981. 576 p.
14. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektropivodov* [Electric drive control systems]. Moscow, 2006. 304 p.
15. Kuo B. *Teoriya i proektirovanie tsifrovyykh sistem upravleniya* [Theory and design of digital control systems]. Moscow, 1986. 448 p.
16. Houppis C.H., Lamont G.B. *Digital control systems: theory, hardware, software*. McGraw-Hill, 1992.

17. Levesque A.H., Giordano A.A. Modeling of digital communication systems using SIMULINK. John Wiley & Sons Limited, 2018. 352 p.
18. Dingyü X., YangQuan C. System simulation techniques with MATLAB and Simulink. Wiley, 2018. 485 p.
19. D'jakonov V. *MATLAB 6: Uchebnyy kurs* [MATLAB 6: Tutorial]. St. Petersburg, 2001. 592 p.
20. Jongrae K. *Dynamic system modeling and analysis with MATLAB and Python: for control engineers*. Wiley-IEEE Press, 2022. 336 p.

Информация об авторах

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

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

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

Масыгин Владимир Станиславович, аспирант кафедры «Системы автоматического управления», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; masiaginvs@susu.ru

Information about the authors

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

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

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, graduate student of the Department of Automatic Control Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; masiaginvs@susu.ru

Статья поступила в редакцию 07.11.2024; принята к публикации 22.11.2024.

The article was submitted 07.11.2024; accepted for publication 22.11.2024