

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РУЛЕВЫМ АГРЕГАТОМ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

Косенок Б.Б., Балякин В.Б., Долгих Д.Е.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара*

Ключевые слова: рулевой агрегат, вектор, контур, модель, модули, пространственного ориентирование, вектор тяги.

Аннотация. Классическое управление ракетоносителем осуществляется с помощью рулевого агрегата жидкостного ракетного двигателя, который, изменяя вектор тяги в одной плоскости, корректирует отклонения ракеты-носителя от расчетной траектории полета. В качестве рулевого агрегата используется рулевая машина с системой рычажных механизмов с демпфером, преобразующим вращательное движение вала рулевой машины в угловое движение сопла рулевого агрегата. В данной работе предлагается использование подобного рулевого агрегата, в качестве базового для пространственного ориентирования ракетоносителя, с изменением подшипников рулевого агрегата и узла подвески сопла на сферические подшипники. Приведена математическая векторная модель, разработанная для получения требуемых углов отклонения рулевых машин от необходимых углов и траектории изменения вектора тяги сопла. Также, приведены варианты конструктивного исполнения предлагаемой системы управления рулевым агрегатом.

DEVELOPMENT OF A STEERING SYSTEM FOR SPATIAL ORIENTATION

Kosenok B.B., Balyakin V.B., Dolgikh D.E.

Samara National Research University, Samara

Keywords: steering unit, vector, contour, model, modules, spatial orientation, thrust vector.

Abstract. Classical control of a launch vehicle is performed using a liquid rocket engine steering unit, which, by changing the thrust vector in one plane, corrects the launch vehicle deviations from the calculated flight trajectory. A steering machine with a system of lever mechanisms with a damper, which converts the rotational motion of the steering machine shaft into the angular motion of the steering unit nozzle, is used as a steering unit. This paper proposes using such a steering unit as a base for spatial orientation of the launch vehicle, with a change in the steering unit bearings and the nozzle suspension unit to spherical bearings. A mathematical vector model is given, developed to obtain the required angles of deviation of the steering machines from the required angles and the trajectory of change in the nozzle thrust vector. Also, design options for the proposed steering unit control system are given.

Введение

Существующие способы управления траекторией движения ракетоносителя [1-17] можно разделить на несколько подклассов:

- механический поворот камеры или сопла жидкостного ракетного двигателя (ЖРД);
- поворотные сопла с отбором газа из топливно-насосных агрегатов;
- аэродинамические рули;
- газодинамические рули;
- кольцевые дефлектора газовой струи;
- использование впрыска рабочего тела;
- управление плазмой катушками магнитного поля.

Наиболее распространенным способом для управления полётом ракетоносителя является механический поворот сопла ЖРД с использованием рулевого агрегата, который за счёт изменения вектора тяги корректирует отклонение ракетоносителя от траектории полёта.

В ряде работ по конструкции ЖРД приводятся такие рулевые агрегаты, которые изменяют вектор тяги двигателя в одной плоскости [15-17], так например, в качестве привода рулевого агрегата ЖРД РД107 используется рулевая машина с системой рычажных

механизмов с демпфером (пружинным механизмом), трансформирующих вращательное движение вала рулевой машины в угловое перемещение сопла рулевого агрегата (рис. 1). Преимуществом данных рулевых агрегатов является простота их конструкции, технологичность и отлаженность производства, также они являются одной из самых серийных конструкций для отечественных ракетносителей.

Ранее авторами проводились работы по анализу различных аспектов работы и оптимизации характеристик узла качания рулевого агрегата, с целью обеспечения заданных максимальных параметров [18, 19].

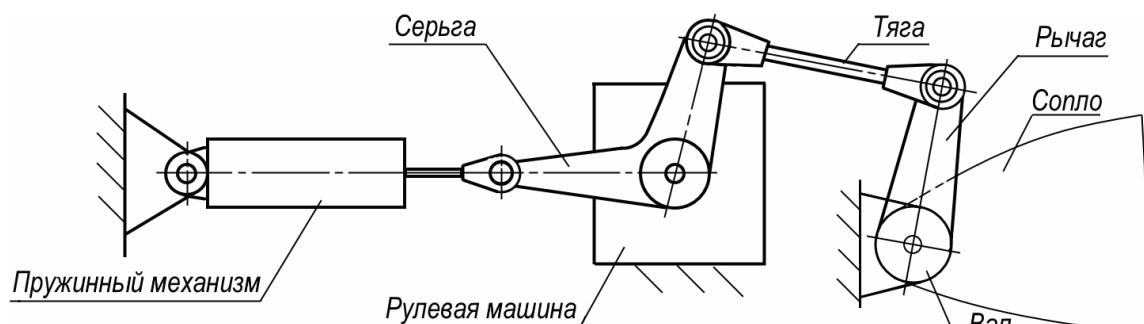


Рис. 1. Схема рулевого агрегата (повернуто)

В тоже время, существующий механизм обладает существенным недостатком – это управление вектором тяги двигателя только в одной плоскости. Существуют механизмы трёхмерной ориентации, например с карданной подвеской [20] (рис. 2), с применением гидроприводов механизмов управления вектором тяги [21] (рис. 3), обладающие достаточно сложной и тяжелой конструкцией.

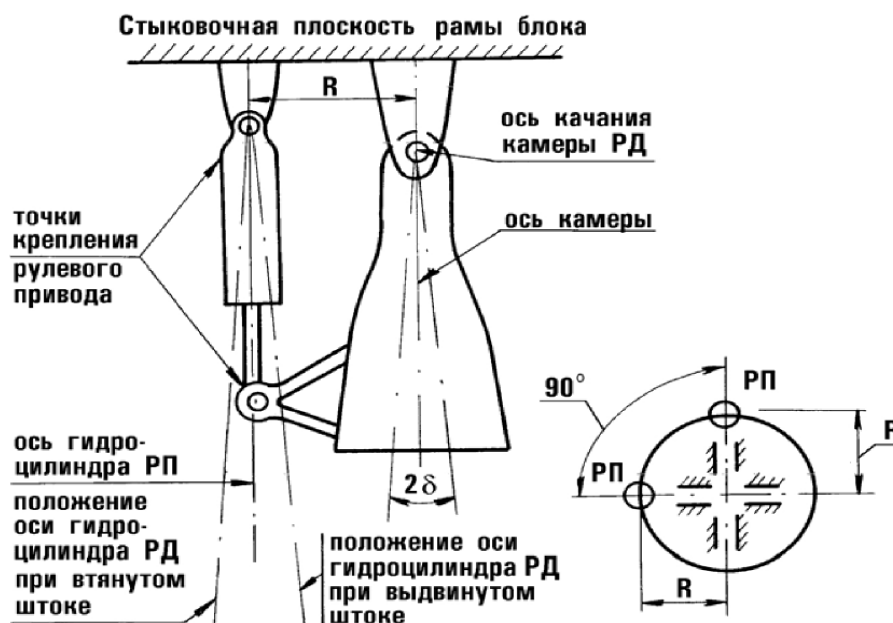


Рис. 2. Схема карданной подвески ЖРД РД-170

В связи с вышеизложенным была поставлена задача разработки, как принципиальной схемы системы управления рулевым агрегатом, удовлетворяющим следующим условиям: трёхмерная ориентация, использование существующих типов приводов, простота конструкции, улучшение надежности и прочности механизма, так и математической модели для получения необходимых значений управляющих параметров системы управления рулевым агрегатом (углов отклонения рулевой машинки) от расчётной траектории вектора тяги двигателя (сопла).



Рис. 3. Общий вид гидропривода

Материалы и методы исследования

Для решения поставленной задачи был использован метод математического моделирования векторных замкнутых контуров [22], реализованный в программном комплексе КДАМ [23].

Основу метода составляют векторные замкнутые контуры, состоящие из отдельных векторов. Вектор $\vec{r}_i$ – это направленный отрезок с параметрами длиной r_i и углами α_i β_i (рис. 4). Используя метод можно геометрически описать любой рычажный механизм, на рисунке 5 приведен пример простого плоского механизма.

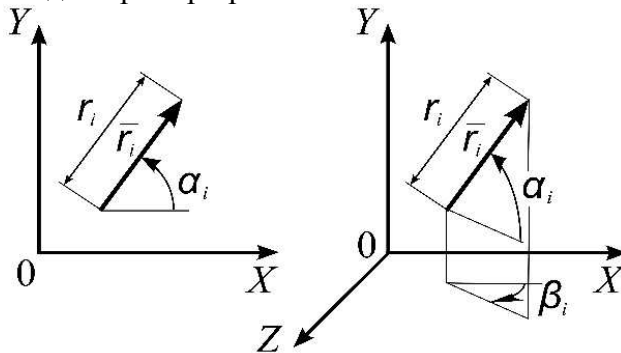


Рис. 4. Параметры плоского и пространственного вектора

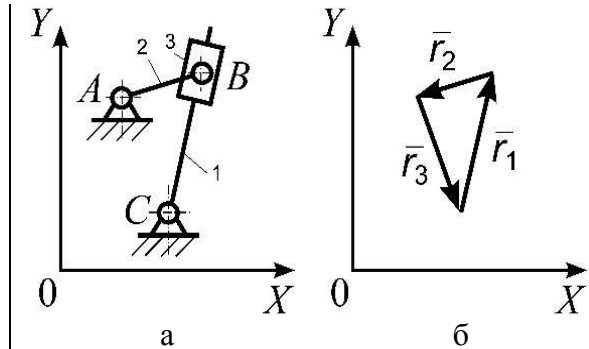


Рис. 5. Структурная схема (а) и векторная модель (б) простого плоского механизма

Из условий замкнутости m -векторного контура на плоскости (1) и (или) в пространстве (2) находятся решения функций – неизвестных параметров, для элементарных векторных замкнутых контуров – модулей:

$$\sum_{i=1}^m r_i \cos \alpha_i = 0; \quad \sum_{i=1}^m r_i \sin \alpha_i = 0; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m r_i \cos \alpha_i \cos \beta_i = 0; \quad \sum_{i=1}^m r_i \sin \alpha_i \cos \beta_i = 0; \quad \sum_{i=1}^m r_i \cos \alpha_i \sin \beta_i = 0. \quad (2)$$

Возможные сочетания функций векторных контуров, определяют для плоскости четыре стандартных модуля (PL1-PL4), а для пространства двадцать модулей (PR1-PR20). Некоторые модули имеют более одного варианта решения.

Первоначально была сформирована математическая векторная модель, отображающая вектор тяги двигателя и рассмотрены возможные варианты её преобразования в работоспособный механизм.

В результате проведенного исследования была получена система управления рулевым агрегатом для пространственного ориентирования. Схема предлагаемого механизма показана на рисунке 6, в составе: 1 – вал привода, 2 – качалка, жестко связанная с валом 1, 3 – тяга со сферическими шарнирами на концах, 4 – площадка, связанная с осью сопла 5, 6 – основной

сферический шарнир, внутренне кольцо которого связано с осью 5 сопла, а внешнее закреплено на каркасе ракеты, 7 – сопло рулевого двигателя.

На рисунке 7,а приведена векторная модель, состоящая из двух модулей, отображающая одну ветку механизма с качалкой и тягой. Первый модуль необходим для вычисления координат вектора тяги и состоит из вектора 1, который отображает направление вектора тяги сопла (ось сопла 5), а векторы 1, 2, 3 – являются координатами конца вектора тяги. Второй модуль описывает положение качалки механизма, и состоит из вектора 18 (качалка 2), вектора 17 (тяги 3), и векторов 19, 20 – координаты X, Y конца вектора 18. На рисунке 7,б приведена полная векторная модель предлагаемого механизма, к ранее описанной модели добавлены ещё два модуля описывающие движение двух других качалок (вектора 10 и 13) и тяг (вектора 8 и 9). На рисунке 7,в приведена параметрическая формула полной векторной модели предлагаемого механизма, состоящего из 1,2,3 и 4-го векторных контуров (стандартных модулей), где

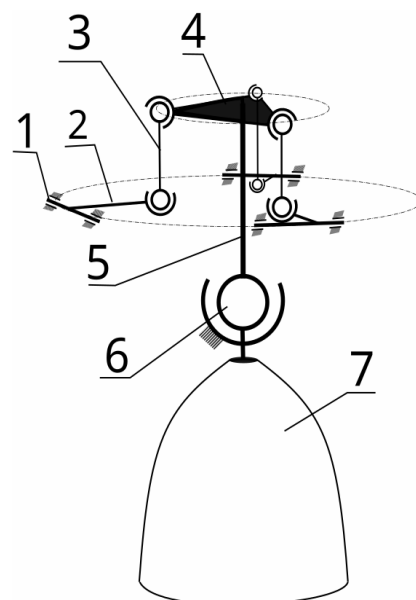


Рис. 6. Структурная схема предлагаемого механизма

m – число векторов модуля, в скобках, например – (1,2,3,4) приведены номера векторов модуля, Пр11 (r_2, r_3, r_4) – номер модуля со списком функций, v – вариант решения модуля. На входе в каждый модуль указаны аргументы контура. На входе 1-го контура, указаны углы поворота 1-го вектора – α_1 и β_1 , которые являются аргументами всей векторной модели и которые отображают изменение ориентации и траектории оси сопла 5 в процессе работы рулевого двигателя.

На рисунке 8 приведены графики изменения входных параметров математической векторной модели, а именно углов α_1 (рис. 8, а) и β_1 (рис. 8, б) вектора 1.

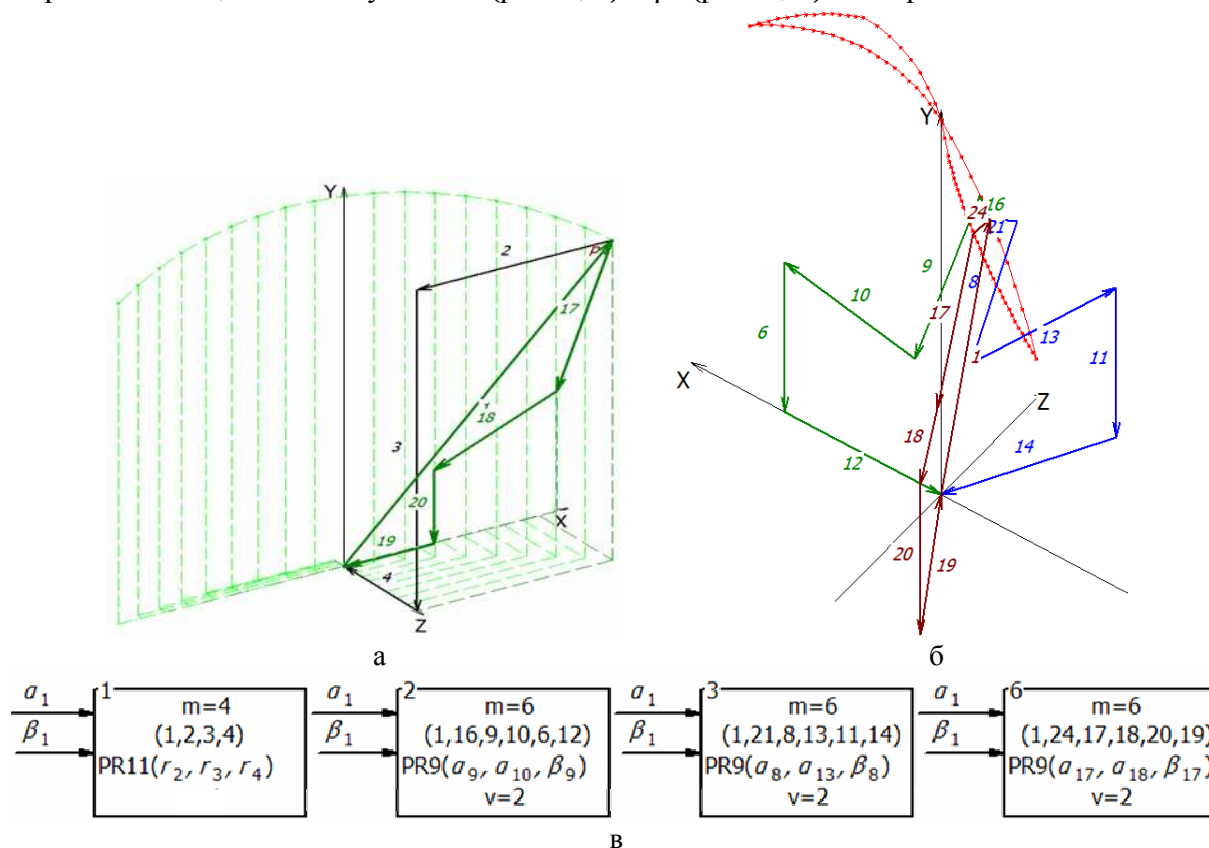


Рис. 7. Векторная модель (а) (показан ветка только одного привода), полная (б) и параметрическая формула полной векторной модели (в)

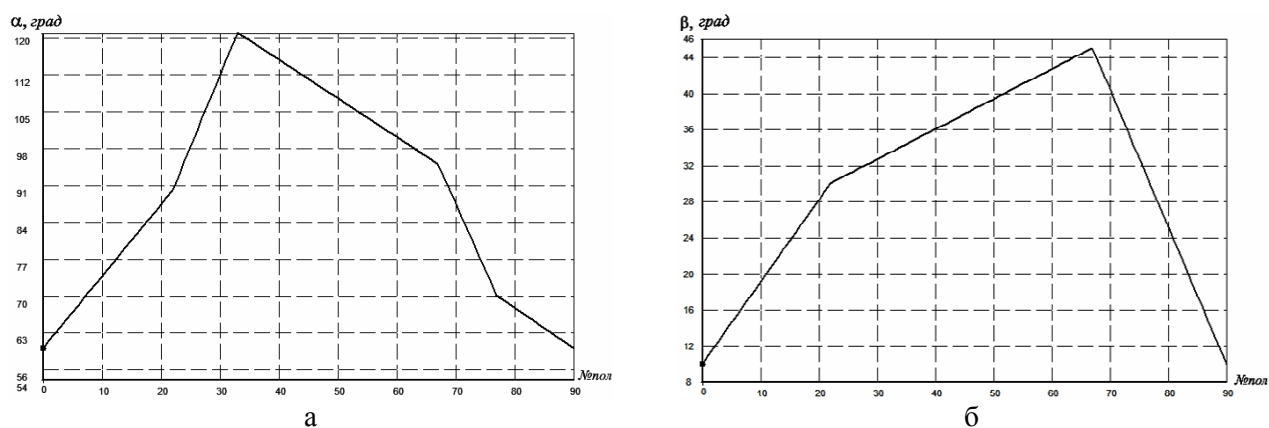


Рис. 8. Графики изменения углов α_1 (а) и β_1 (б) вектора 1 (аргументов векторной модели) от числа положений

На рисунке 9 представлен, полученный в результате расчёта векторной модели, совмещённый график отклонения углов α всех трёх управляющих качалок.

На рисунке 10 представлены возможные реализации системы управления рулевым агрегатом для пространственного ориентирования, состоящего из трёх приводов (для лучшего визуального восприятия пружинный механизм на приводах не показан).

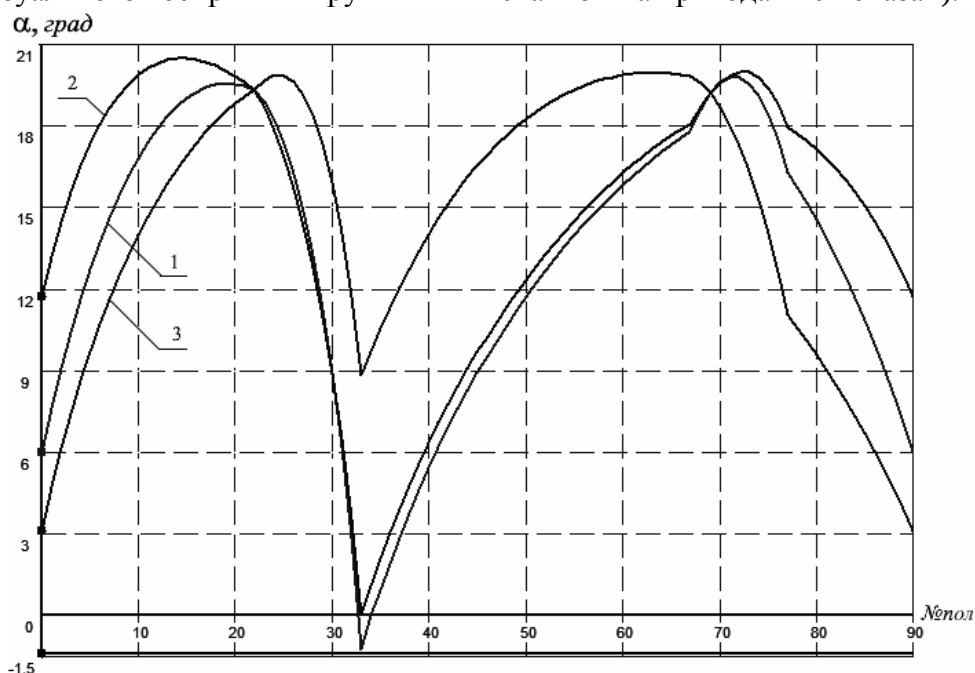


Рис. 9. Совмещённые графики требуемых углов α управляющих качалок: 1 – α_{13} , 2 – α_{10} , 3 – α_{18}

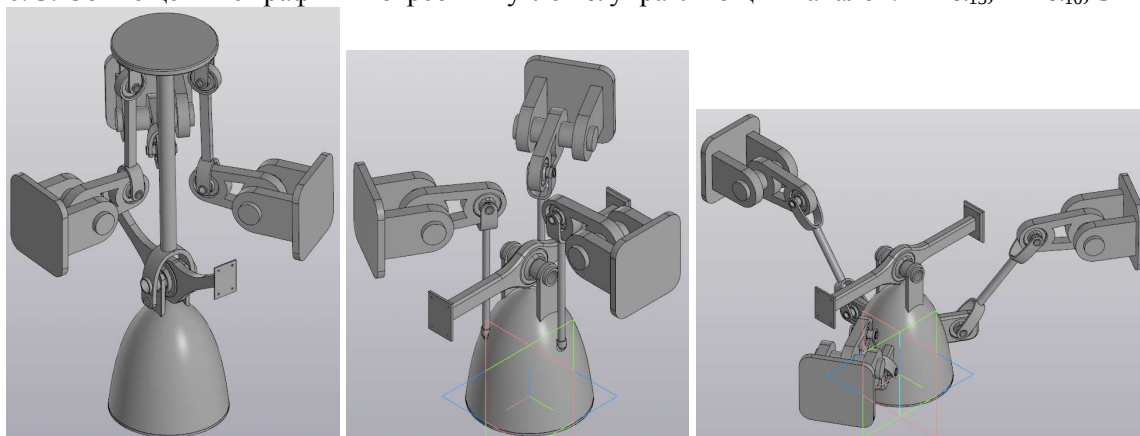


Рис. 10. Возможные конструктивные реализации системы управления рулевым агрегатом для пространственного ориентирования

Заключение. Полученная система управления рулевым агрегатом для пространственного ориентирования базируется на отработанных приводах РМ(РД-107) ракетносителя Союз, отличается простотой конструкции, позволяет снизить затраты на проектирование, изготовление и эксплуатацию РА и позволяет реализовывать любую траекторию изменения вектора тяги, что улучшает управляемость ракеты, экономит топливо и уменьшает время реагирования на отклонение от заданного курса.

Список литературы

1. Шестерня В.И., Кирышкин Г.А., Голиковская К.Ф. Перспективы управления вектором тяги // Решетневские чтения: Материалы XXVII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2023. – Часть 1. – С. 218-219.
2. Тищенко К.О., Брыков Н.А., Беляева А.С. Управление вектором тяги реактивного двигателя с помощью внутрисоплового интерцептора // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Сборник докладов Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. – Самара: Самарский университет, 2021. – Т. 2. – С. 177-178.
3. Тимнат И.М. Ракетные двигатели на химическом топливе. – М.: Мир, 1990. – 294 с.
4. Тищенко К.О., Брыков Н.А. Использование внутрисопловых интерцепторов для управления вектором тяги // Вестник Концерна ВКО "Алмаз – Антей". – 2023. – № 2. – С. 29-35.
5. Тищенко К.О., Брыков Н.А., Беляева А.С. Параметрическое исследование влияния размещения и высоты стержневого интерцептора на характеристики сопла реактивного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2021. – Т. 20, № 4. – С. 52-58.
6. Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Gryaznova I.V., Voronova V.V., Tumanyan Kh.A., Konyushkov E.I. Solving Innovative Problems of Thrust Vector Control Based on Euler's Scientific Legacy // Civil Engineering Journal. 2023, vol. 9, no. 11, pp. 2868-2895.
7. Белоногов О.Б. Нелинейная математическая модель рулевого тракта системы управления вектором тяги жидкостного ракетного двигателя // Космическая техника и технологии. – 2023. – № 3(42). – С. 88-102.
8. Белоконов И.В., Сеницын Л.И. Анализ стратегий управления маховиком для обеспечения гироскопической стабилизации вектора тяги при маневрировании наноспутника // Космонавтика и ракетостроение. – 2022. – № 3(126). – С. 17-29.
9. Гончаров В.Г., Барабанов М.М., Яковлева М.А. Использование электрического привода для управления отклонением вектора тяги маршевого двигателя в ракетно-космической технике // Главный механик. – 2024. – Т. 21, № 9(253). – С. 50-58.
10. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Яковчук М.С. Многопараметрическая оптимизация органов управления тяги, основанных на вдуве струи газа в сверхзвуковую часть сопла // Вычислительные методы и программирование. – 2018. – Т. 19, № 2. – С. 158-172.
11. Беляева А.С. Управление вектором тяги с помощью поворотного управляющего сопла // Научный альманах Центрального Черноземья. – 2022. – № 1-10. – С. 26-34.
12. Патент №2594844 РФ. Система управления вектором тяги жидкостного ракетного двигателя / А.М. Губертов, В.В. Миронов, С.В. Мосолов, М.В. Ульянова, Н.А. Давыденко. – Заявка №2015129986 от 21.07.2015; опубл. 20.08.2016.
13. Патент №2644810 РФ. Устройство управления вектором тяги плазменного двигателя (варианты) и способ управления вектором тяги плазменного двигателя / А.М. Бишаев, Г.Э. Бугров, А.В. Десятков, М.В. Козинцева, П.Г. Смирнов. – Заявка №2015150774 от 27.11.2015; опубл. 14.02.2018.
14. Патент №130004 РФ. Сопло реактивного двигателя с управлением вектором тяги / В.Г. Кажан, А.В. Кажан, А.В. Шенкин. – Заявка №2012136206/06 от 24.08.2012; опубл. 10.07.2013.
15. Гахун Г.Г., Баулин В.И., Володин В.А., Курпатенков В.Д., Краев М.В., Трофимов В.Ф. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: учебник / Под общ. ред. Г.Г. Гахуна. – М.: Машиностроение, 1989. – 424с.
16. Павутницкий Ю.В., Мазарченков В.А., Шиленков М.В., Герасимов А.Б. Отечественные ракеты-носители. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 1996. – 178 с.
17. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник / под ред. Д.А. Ягодникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 460 с.
18. Балякин В.Б., Лаврин А.В. Анализ условий комплексного нагружения радиальных подшипников узлов качания рулевых агрегатов ЖРД // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Сборник докладов Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2021. – Т. 2. – С. 99-100.
19. Косенок Б.Б., Долгих Д.Е. Компенсация моментных нагрузок узла качания рулевого агрегата жидкостного ракетного двигателя // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №17-2. – С. 230-235.

20. Петренко С.А., Гимадиев А.Г., Варивода В.Д. Система рулевых приводов жидкостных ракетных двигателей ракеты-носителя «Энергия»: учебное пособие. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2010. – 31 с.
21. КБ Арсенал, Рулевые приводы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kbarsenal.ru/index.php/istoriya/raketnoe-napravlenie/rulevie-privoda>.
22. Семенов Б.П., Косенок Б.Б. Методы и средства динамического синтеза механизмов авиационных энергоустановок. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. – 281 с.
23. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2010616342. Программа КДАМ (Кинематический и динамический анализ механизмов) / Б.Б. Косенок, В.П. Тукмаков. – Заявка №2010614593 от 29.07.2010; зарег. 24.09.2010.

References

1. Shesternya V.I., Kiryushkin G.A., Golikovskaya K.F. Prospects for Thrust Vector Control // Reshetnev Readings: Proceedings of the XXVII International Scientific and Practical Conference Dedicated to the Memory of the General Designer of Rocket and Space Systems Academician M.F. Reshetnev. In 2 parts. – Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after academician M. F. Reshetnev, 2023. – Part 1. – P. 218-219.
2. Tishchenko K.O., Brykov N.A., Belyaeva A.S. Thrust Vector Control of a Jet Engine Using an In-Nozzle Interceptor // Problems and Prospects of Development of Engine Building: Collection of Reports of the International Scientific and Technical Conference. In 2 vol. – Samara: Samara University, 2021. Vol. 2. – P. 177-178.
3. Timmat I.M. Rocket engines on chemical fuel. – M.: World, 1990. – 294 p.
4. Tishchenko K.O., Brykov N.A. Use of intra-nozzle interceptors for thrust vector control // Bulletin of the Almaz-Antey Air and Space Defense Concern. 2023, no. 2, pp. 29-35.
5. Tishchenko K.O., Brykov N.A., Belyaeva A.S. Parametric study of the influence of the placement and height of the rod interceptor on the characteristics of the jet engine nozzle // Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering. 2021, vol. 20, no. 4, pp. 52-58.
6. Sazonov Yu.A., Mokhov M.A., Gryaznova I.V., Voronova V.V., Tumanyan Kh.A., Konyushkov E.I. Solving Innovative Problems of Thrust Vector Control Based on Euler's Scientific Legacy // Civil Engineering Journal. 2023, vol. 9, no. 11, pp. 2868-2895.
7. Belonogov O.B. Nonlinear Mathematical Model of the Steering Path of the Thrust Vector Control System of a Liquid Rocket Engine // Space Engineering and Technology. 2023, no. 3(42), pp. 88-102.
8. Belokonov I.V., Sinitsyn L.I. Analysis of Flywheel Control Strategies to Ensure Gyroscopic Stabilization of the Thrust Vector During Nanosatellite Maneuvering // Cosmonautics and Rocket Science. 2022, no. 3(126), pp. 17-29.
9. Goncharov V.G., Barabanov M.M., Yakovleva M.A. Using an electric drive to control the thrust vector deviation of a cruise engine in rocket and space technology // Chief Mechanic. 2024, vol. 21, no. 9(253), pp. 50-58.
10. Volkov K.N., Emelianov V.N., Yakovchuk M.S. Multiparameter optimization of thrust controls based on gas jet injection into the supersonic part of the nozzle // Computational methods and programming. 2018, vol. 19, no. 2, pp. 158-172.
11. Belyaeva A.S. Thrust vector control using a rotary control nozzle // Scientific almanac of the Central Black Earth Region. 2022, no. 1-10, pp. 26-34.
12. Patent No. 2594844 RU. Thrust vector control system for a liquid rocket engine / A.M. Gubertov, V.V. Mironov, S.V. Mosolov, M.V. Ulyanova, N.A. Davydenko. – Appl. No. 2015129986 from 21.07.2015; publ. 20.08.2016.
13. Patent No. 2644810 RU. Plasma engine thrust vector control device (variants) and method for controlling the thrust vector of a plasma engine / A.M. Bishaev, G.E. Bugrov, A.V. Desyatkov, M.V. Kozintseva, P.G. Smirnov. – Appl. No. 2015150774 from 27.11.2015; publ. 14.02.2018.
14. Patent No. 130004 Ru. Jet engine nozzle with thrust vector control / V.G. Kazhan, A.V. Kazhan, A.V. Shenkin. – Appl. No. 2012136206 from 24.08.2012; publ. 10.07.2013.
15. Gakhun G.G., Baulin V.I., Volodin V.A., Kurpatenkov V.D., Kraev M.V., Trofimov V.F. Design and engineering of liquid rocket engines: textbook / Gener edited by G.G. Gakhun. – M.: Mechanical Engineering, 1989. – 424 p.
16. Pavutnitsky Yu.V., Mazarchenkov V.A., Shilenkov M.V., Gerasimov A.B. Domestic launch vehicles. – SPb.: Publ. center of SPsSMTU, 1996. – 178 p.
17. Dobrovolsky M.V. Liquid rocket engines. Design fundamentals: textbook / ed. D.A. Yagodnikov. – M.: Publ. house of MSTU n.a. N.E. Bauman, 2020. – 460 p.
18. Balyakin V.B., Lavrin A.V. Analysis of complex loading conditions of radial bearings of rocking units of liquid-propellant rocket engine steering units // Problems and prospects for the development of engine building: Collection of reports of the International Scientific and Technical Conference. In 2 vol. – Samara: Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, 2021. – Vol. 2. – P. 99-100.
19. Kosenok B.B., Dolgikh D.E. Compensation of moment loads of the rocking unit of the steering unit of a liquid rocket engine // Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production. 2022, no. 17-2, pp. 230-235.

20. Petrenko S.A., Gimadiev A.G., Varivoda V.D. Steering Actuator System of Liquid Rocket Engines of the Energia Launch Vehicle: study guide. – Samara: Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, 2010. – 31 p.
21. KB Arsenal, Steering Actuators [Electronically recourses]. – Access mode: <https://kbarsenal.ru/index.php/istoriya/raketnoe-napravlenie/rulevie-privoda>.
22. Semenov B.P., Kosenok B.B. Methods and Means of Dynamic Synthesis of Mechanisms of Aircraft Power Plants. – Samara: Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2010. - 281 p.
23. Certificate of official registration of computer programs No. 2010616342. K DAM (Kinematic and dynamic analysis of mechanisms) program / B.B. Kosenok, V.P. Tukmakov. – Appl. No. 2010614593 from 29.07.2010; reg. 24.09.2010.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Косенок Борис Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин	Kosenok Boris Borisovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of machine design principles
Балякин Валерий Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры основ конструирования машин	Balyakin Valery Borisovich – candidate of technical sciences, professor of the Department of machine design principles
Долгих Дмитрий Евгеньевич – аспирант borkos@yandex.ru	Dolgikh Dmitry Evgenievich – postgraduate student

Получена 11.02.2025