

А. П. АЛПАТОВ

ПРОБЛЕМИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В УКРАЇНІ. КЕРОВАНА ДИНАМІКА РАКЕТ ТА КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Інститут технічної механіки

Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, м. Дніпро, 49005, Україна; e-mail: aalpatov@ukr.net

Метою статті є огляд головних результатів наукових досліджень, що були виконані в 2016 – 2020 роках науковцями відділу системного аналізу та проблем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України. При огляді результатів досліджень застосовано метод феноменологічного аналізу відповідної інформації. Проведено системний аналіз тенденцій розвитку застосування космічних технологій у різних сферах людської діяльності. Обговорюються методи оцінки проєктів космічних програм, алгоритми формування науково-технічних програм. Описано результати дослідження динаміки космічних апаратів та їх складових частин. Досліджено динаміку космічних тросових систем, а також мікросупутників. Розглянуто тенденції розвитку космічних транспортних систем у світі, та особливості їх розвитку в Україні, а також стан методичної бази проєктування ракетно-космічної техніки в Україні. Розроблено рекомендації щодо розробки нормативних документів та напрямків їх вдосконалення.

Розглянуто та найшли подальший розвиток методи системного аналізу щодо їх застосування у космічній галузі. Розроблено метод структурно-параметричної ідентифікації в задачі моделювання об'єктів з багатовимірним виходом в класі бета-авторегресійних моделей, в яких співвідношення вагових коефіцієнтів авторегресії визначаються на основі функцій щільності бета-розподілів. За принципами методу групового урахування аргументів побудовано і досліджено критерій регулярності для моделювання в класі бета-авторегресійних моделей в умовах квазіповторних спостережень. Проведено дослідження щодо аналізу, синтезу та оптимізації функціонування систем багаторівневого, інтелектуального й мережевого управління в умовах невизначеності. Набули розвитку методичні підходи до створення симбіотичних автономних систем авіакосмічного та транспортного призначення. Розроблено нову технологію побудови сурогатних моделей, що використовує підходи, засновані на синергії методів предметної області і когнітивних технологій, які базуються на досягненнях загальнонаукових дисциплін. Частина наукових результатів використана у практичній діяльності Державного підприємства «КБ «Південне».

Ключові слова: системні дослідження, космічний апарат, керований ракетний об'єкт, проєктні параметри, параметри траєкторії, програма керування рухом ракети, числові методи оптимізації, робастні системи керування, промислові орбітальні комплекси, дистанційне зондування Землі, тросові системи.

1. Аксёненко А. В., Гурский А. И., Ключков А. С., Кондратюк Е. А., Сенькин В. С., Сюткина-Доронина С. В. Анализ тенденций развития проектных параметров и основных характеристик ракет перспективных ракетных систем залпового огня. Космическая техника. Ракетное вооружение. 2020. № 1. С. 13–25. <https://doi.org/10.33136/stma2020.01.013>
2. Аксёненко А. В., Баранов Е. Ю., Гурский А. И., Ключков А. С., Морозов А. С., Алпатов А. П., Сенькин В. С., Сюткина-Доронина С. В. Методическое обеспечение для оптимизации на начальном этапе проектирования проектных параметров, параметров траектории и программ управления движением ракетного объекта. Космическая техника. Ракетное вооружение. 2018. № 2 (116). С. 101–116. <https://doi.org/10.33136/stma2018.02.101>
3. Алпатов А. П., Маслова А. И., Хорошилов С. В. Бесконтактное удаление космического мусора ионным лучом. Динамика и управление. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland. 2018. 339 с.
4. Алпатов А. П., Марченко В. Т., Хорольский П. П., Сазина Н. П., Жукова Л. Г. Об одном методическом подходе к решению проблемы количественной оценки рисков проектов по созданию ракетно-космической техники (часть 1). Технічна механіка. 2018. № 1. С. 84–96. <https://doi.org/10.15407/itm2018.01.084>
5. Алпатов А. П., Палій О. С., Скорік О. Д. Розробка конструктивної схеми та вибір проєктних параметрів аеродинамічної системи відведення з орбіти розгінних ступенів ракет-носіїв. Наука та інновації. Т. 13, № 4. 2017. С. 29–39. <https://doi.org/10.15407/scine13.04.029>
6. Алпатов А. П., Гольдштейн Ю. М. Баллистический анализ распределения орбит космических аппаратов различного функционального назначения. Технічна механіка. 2017. № 2. С. 33–40. <https://doi.org/10.15407/itm2017.02.033>
7. Алпатов А. П., Гольдштейн Ю. М. Выбор орбит для утилизации космического мусора. Технічна механіка. 2019. № 2. С. 5–15. <https://doi.org/10.15407/itm2019.02.005>
8. Алпатов А. П., Гольдштейн Ю. М. Методика кластеризации орбит обслуживаемых космических аппаратов. Системні технології. 2019. № 3. С. 91–98. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-122-2019-11>
9. Алпатов А. П., Гольдштейн Ю. М. О выборе оптимального маршрута орбитального сервисного обслуживания. Технічна механіка. 2019. № 4. С. 21–28. <https://doi.org/10.15407/itm2019.04.021>
10. Алпатов А. П., Своробін Д. С., Скорик О. Д. Система безконтактного видалення об'єктів космічного сміття з навколоземних орбіт з аеродинамічним компенсатором. Технічна механіка. 2016. № 3. С. 51–56.

11. Астапенко В. Н., Марченко В. Т., Сазина Н. П., Хорольский П. П. Оценка объема спроса национально-го рынка на информацию дистанционного зондирования Земли. *Технічна механіка*. 2016. № 1. С. 60–73.
12. Астапенко В. Н., Марченко В. Т., Хорольский П. П., Сазина Н. П. Оценка объема спроса национально-го рынка на информацию дистанционного зондирования земли высокого разрешения по состоянию на конец 2015 года. *Технічна механіка*. 2016. № 3. С. 68–76.
13. Волошенко О. Л. Світові тенденції розвитку низькоорбітальних космічних систем оптико-електронного спостереження Землі. *Технічна механіка*. 2020. № 3. С. 39–53. <https://doi.org/10.15407/itm2020.03.039>
14. Гольдштейн Ю. М. Про вибір орбіти базування сервісного космічного апарата. *Технічна механіка*. 2020. № 3. С. 30–38. <https://doi.org/10.15407/itm2020.03.030>
15. Дегтярєв А. В., Кашанов А. Э., Сюткина С. В. К выбору приоритетных вариантов модернизации раке-тно-космических комплексов. *Технічна механіка*. 2012. № 2. С. 94–105.
16. Заявка на патент на винахід України № а202007504, МПК В 64 G 1/62. Пристрій відведення об'єктів космічного сміття з навколоземних орбіт. *Алпатов А. П., Палій О. С., Лапханов Е. О.* а202007504 ; зая-вл. 24.11.2020.
17. Заявка на патент на винахід України № а202007505, МПК В 64 G 1/62. Пристрій відведення відпра-цьованих космічних апаратів з низьких навколоземних орбіт. *Алпатов А. П., Палій О. С., Лапха-нов Е. О.* а202007505; заявл. 24.11.2020.
18. Заявка на патент на винахід України № а201907947, МПК В 64 G 1/62. Пристрій для зменшення тер-міну орбітального існування космічних об'єктів на низьких навколоземних орбітах. *Алпатов А. П., Па-лій О. С., Лапханов Е. О.* а201907947; заявл. 11.07.2019.
19. Лапханов Е. О. Особливості застосування магнітних органів керування для здійснення грубої стабілізації космічних апаратів з аеромагнітними системами відведення. *Технічна механіка*. 2020. №1. С. 56–66. <https://doi.org/10.15407/itm2020.01.056>
20. Лапханов Е. О. Особливості створення засобів відведення космічних апаратів з навколоземних робо-чих орбіт. *Технічна механіка*. 2019. № 2. С. 16–30. <https://doi.org/10.15407/itm2019.02.016>
21. Марченко В. Т., Сазина Н. П., Хорольский П. П., Возненко А. А. Модель расчета ожидаемых затрат на создание новой ракетно-космической техники с учетом факторов неопределенности. *Технічна механіка*. 2018. № 2. С. 30–43. <https://doi.org/10.15407/itm2018.02.030>
22. Марченко В. Т., Сюткина-Доронина С. В., Сазина Н. П. Об одном методе моделирования неопределен-ностей технико-экономических данных в задачах оценивания научно-технических проектов. *Технічна механіка*. 2016. №2. С. 137–146.
23. Марченко В. Т., Сазина Н. П., Хорольский П. П., Жукова Л. Г. Алгоритм розрахунків технічного рівня системи геостационарного спутникового зв'язку. *Технічна механіка*. 2020. № 1. С. 76–90. <https://doi.org/10.15407/itm2020.01.076>
24. Марченко В. Т., Сазина Н. П., Хорольський П. П., Чернецька Н. Я. Аналіз тенденцій розвитку засобів дистанційного зондування Землі. *Технічна механіка*. 2020. № 2. С. 47–56. <https://doi.org/10.15407/itm2020.02.047>
25. Марченко В. Т., Хорольский П. П., Сазина Н. П. Анализ возможных путей выхода Украины на между-народную арену по дистанционному зондированию Земли. *Технічна механіка*. 2019. № 1. С. 107–111. <https://doi.org/10.15407/itm2019.01.107>
26. Петляк О. А. Марченко В. Т. Про один із підходів до оцінки технічного рівня геостационарних супутників зв'язку. *Космічна наука і технологія*. 2020. 26, № 5 (126). С. 5–14. <https://doi.org/10.15407/knit2020.05.005>
27. Марченко В. Т., Петляк Е. П., Сазина Н. П., Хорольский П. П. Количественная оценка технического уров-ня космических систем дистанционного зондирования земли и систем геостационарной спутниковой связи: методический подход. *Технічна механіка*. 2019. № 4. С. 92–106. <https://doi.org/10.15407/itm2019.04.092>
28. Марченко В. Т., Петляк Е. П., Сазина Н. П., Хорольский П. П. О новом методе оценки технического уров-ня космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. *Технічна механіка*. 2017. № 2. С. 41–50. <https://doi.org/10.15407/itm2017.02.041>
29. Марченко В. Т., Хорольский П. П., Жукова Л. Г., Сазина Н. П. Алгоритм оценки технического уровня космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. *Технічна механіка*. 2017. № 4. С.41–48. <https://doi.org/10.15407/itm2017.04.041>
30. Маслова А. И., Пироженко А. В. Изменение орбиты под действием малого постоянного торможения. *Космічна наука і технологія*. 2016. Т. 22, № 6. С. 20–24. <https://doi.org/10.15407/knit2016.06.020>
31. Маслова А. И. Оценка возможных значений плотности атмосферы для различных условий орбитально-го полета. *Технічна механіка*. 2019. № 3. С. 54–65. <https://doi.org/10.15407/itm2019.03.054>
32. Маслова А. И., Мищенко А. В., Пироженко А. В., Храмов Д. А. Исследования закономерностей дина-мики электродинамической космической тросовой системы для определения возможности создания высокоэффективного устройства пассивного увода космического мусора с низких околоземных орбит. *Космічна наука і технологія*. 2015. Т. 21, № 1. С. 20–24. <https://doi.org/10.15407/knit2015.01.020>
33. Мищенко А. В., Пироженко А. В. К определению проектных параметров электродинамической космиче-ской тросовой системы. *Технічна механіка*. 2020. №1. С. 19–30. <https://doi.org/10.15407/itm2020.01.019>
34. Мищенко А. В. К определению длины троса экспериментальной электродинамической системы. *Техні-чна механіка*. 2017. №4. С. 55–63. <https://doi.org/10.15407/itm2017.04.055>
35. Патент України на винахід № UA121460C2, МПК7 В64G 1/24, В64G 1/62. Спосіб безконтактного вида-лення об'єктів космічного сміття з навколоземних орбіт з аеродинамічним компенсатором. *Алпатов А. П., Своробін Д. С., Скорик О. Д.* а201607424; заявл. 07.07.2016, опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11. 10 с.

36. Пироженко А. В., Маслова А. И., Васильев В. В. О влиянии второй зональной гармоники на движение спутника по почти круговым орбитам. *Космічна наука і технологія*. 2019. Т. 25, № 2. С. 3–14. <https://doi.org/10.15407/knit2019.02.003>
37. Пироженко А. В., Мищенко А. В. Малая экспериментальная электродинамическая космическая тросовая система. Электрическая модель. *Космічна наука і технологія*. 2018. Т. 24, № 3. С. 3–10. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.003>
38. Пироженко А. В., Маслова А. И., Мищенко А. В., Храмов Д. А., Волощенко О. Л. Проект малой экспериментальной электродинамической космической тросовой системы. *Космічна наука і технологія*. 2018. Т. 24, № 2. С. 3–11. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.003>
39. Прокопчук Ю. А. Интуиция: опыт формального исследования. Днепр: Изд-во ГВУЗ «ПГАСА», 2021. 276 с.
40. Прокопчук Ю. А. набросок формальной теории творчества. Днепр: ГВУЗ «ПГАСА», 2017. 452 с.
41. Савчук А. П., Фоков А. А. Определение параметров некооперированных объектов в задачах орбитального сервиса. *Технічна механіка*. 2018. № 4. С. 30–45. <https://doi.org/10.15407/itm2018.04.030>
42. Сарычев А. П. Алгоритм поиска оптимального множества регрессоров в задаче векторной регрессии. *Системні технології*. 2016. Випуск 3 (104). С. 14–24.
43. Сарычев А. П. Классификация состояний динамического объекта, функционирование которого описывается одномерной авторегрессией. *Системні технології*. 2019. Випуск 5 (124). С. 61–76.
44. Сарычев А. П. Классификация состояний динамической системы, функционирование которой описывается векторной авторегрессией. *Системні технології*. 2019. Випуск 4 (123). С. 131–154. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-123-2019-14>
45. Сарычев А. П. Линейная авторегрессия со случайными коэффициентами на основе метода группового учёта аргументов в условиях квазиповторных наблюдений. *Управляющие системы и машины*. 2016. № 1. С. 3–15. <https://doi.org/10.15407/usim.2016.01.003>
46. Сарычев О. П., Первій Б. А. Моделі руху космічних об'єктів на основі часових рядів TLE-елементів. *Технічна механіка*. 2021. № 1. С. 51–62. <https://doi.org/10.15407/itm2021.01.051>
47. Сарычев А. П. Моделирование в классе систем авторегрессионных уравнений со случайными коэффициентами в условиях структурной неопределенности. *Системные технологии моделирования сложных процессов: монография под общей ред. проф. А. И. Михалёва*. Днепр: НМетАУ-ИБК «Системные технологии». 2016. С. 463–499.
48. Своробин Д. С., Фоков А. А., Хорошилов С. В. Анализ целесообразности использования аэродинамического компенсатора при бесконтактном удалении космического мусора. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2018. № 6. С. 4–11.
49. Сенькин В. С., Сюткина-Доронина С. В. Исследование влияния вариаций параметров управляемого ракетного объекта на дальность полета. *Технічна механіка*. 2016. № 4. С. 35–49.
50. Сенькин В. С., Сюткина-Доронина С. В. Исследование чувствительности целевого функционала к вариациям проектных параметров управляемого ракетного объекта. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2016. № 3. С. 9–17.
51. Сенькин В. С., Сюткина-Доронина С. В. К выбору методов, используемых при оптимизации проектных параметров и программ управления ракетным объектом. *Технічна механіка*. 2019. № 1. С. 38–52. <https://doi.org/10.15407/itm2019.01.038>
52. Сенькин В. С., Сюткина-Доронина С. В. Совместное применение методов случайного поиска с градиентными методами оптимизации проектных параметров и программ управления ракетным объектом. *Технічна механіка*. 2018. № 2. С. 44–59. <https://doi.org/10.15407/itm2018.02.044>
53. Сюткина С. В. Математическая модель для определения области допустимых погрешностей параметров установки ракеты-носителя на стартовом столе. *Технічна механіка*. 2013. № 2. С. 26–35.
54. Сюткина-Доронина С. В. К вопросу оптимизации проектных параметров и программ управления ракетного объекта с ракетным двигателем на твёрдом топливе. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2017. № 2 (137). С. 44–59.
55. Тарасов С. В., Фоков А. А. Модельные задачи для класса систем взаимного позиционирования космического аппарата и полезной нагрузки. *Технічна механіка*. 2017. № 2. С. 20–32. <https://doi.org/10.15407/itm2017.02.020>
56. Фоков А. А., Хорошилов С. В. Валидация упрощенного метода расчета силы воздействия факела электрореактивного двигателя на орбитальный объект. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2016. № 2 (129). С. 55–66.
57. Фоков А. А., Савчук А. П. Алгоритмы функционирования автономной системы замедления вращательного движения некооперированного объекта орбитального сервиса. *Технічна механіка*. 2019. № 4. С. 44–58. <https://doi.org/10.15407/itm2019.04.044>
58. Фоков О. А., Хорошилов С. В., Своробин Д. С. Анализ переваг використання аеродинамічного компенсатора при безконтактному видаленні космічного сміття. *Технічна механіка*. 2020. № 4. С. 55–54. <https://doi.org/10.15407/itm2020.04.055>
59. Фоков О. А., Хорошилов С. В., Своробин Д. С. Відносний рух космічного апарата з аеродинамічним компенсатором у перпендикулярному до площини орбіти напрямку при безконтактному видаленні космічного сміття. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 2 (129). С. 15–27.
60. Хорошилов С. В. Алгоритм управление относительным движением в плоскости орбиты космического аппарата для бесконтактного удаления космического мусора. *Космічна наука і технологія*. 2019. № 25 (1). С. 13–23. <https://doi.org/10.15407/scine14.04.005>

61. Хорошилов С. В. Анализ робастности системы управления относительным движением «пастуха с ионным лучом». Технічна механіка. 2018. № 1. С. 48–58. <https://doi.org/10.15407/itm2018.01.048>
62. Хорошилов С. В. Синтез робастного регулятора системы управления «пастуха с ионным лучом». Технічна механіка. 2017. № 1. С. 26–39. <https://doi.org/10.15407/itm2017.01.026>
63. Alpatov A. P., Holdstein Y. M. On the choice of ballistic parameters of the orbital service device. Технічна механіка. 2019. № 1. С. 25–37. <https://doi.org/10.15407/itm2019.01.025>
64. Alpatov A., Khoroshylov S., Lapkhanov E. Synthesizing an algorithm to control the angular motion of spacecraft equipped with an aeromagnetic deorbiting system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 1, Iss. 5(103). Pp. 37–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.192813>
65. Alpatov A., Lapkhanov E. The use of mobile control methods for stabilization of a spacecraft with aeromagnetic deorbiting system. System technologies. 2019. No. 6. P. 41–54. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-6-125-2019-04>
66. Alpatov A. P., Khoroshylov S. V., Maslova A. I. Contactless de-orbiting of space debris by the ion beam. Dynamics and control. Kyiv: Akademperiodyka. 2019. 170 p. <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.383.170>
67. Alpatov A., Cichocki F., Fokov A., Khoroshylov S., Merino M., Zakrzhevskii A. Determination of the force transmitted by an ion thruster plasma plume to an orbital object. Acta Astronautica. 2016. No 119. P. 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.11.020>
68. Alpatov A., Khoroshylov S., Bombardelli C. Relative Control of an Ion Beam Shepherd Satellite Using the Impulse Compensation Thruster. Acta Astronautica. 2018. Vol. 151. P. 543–554. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.056>
69. Khoroshylov S. Out-of-plane relative control of an ion beam shepherd satellite using yaw attitude deviations. Acta Astronautica. 2019. Vol. 164. P. 254–261. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.08.016>
70. Khoroshylov S. Relative control of an ion beam shepherd satellite in eccentric orbits. Acta Astronautica. 2020. Vol. 176. P. 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.06.027>
71. Khoroshylov S. Relative motion control system of spacecraft for contactless space debris removal. Science and Innovation. 2018. № 14(4). С. 5–16. <https://doi.org/10.15407/scine14.04.005>
72. Khoroshylov S., Redka M. Relative control of an underactuated spacecraft using reinforcement learning. Technical Mechanics. 2020. No 4. P. 43–54. <https://doi.org/10.15407/itm2020.04.043>
73. Lapkhanov E., Khoroshylov S. Development of the aeromagnetic space debris deorbiting system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 5, Iss. 5(101). Pp. 30–37. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179382>
74. Nosov P. S., Popovych I. S., Cherniavskiy V. V., Zinchenko S. M., Prokopchuk Y. A., Makarchuk D. V. Automated Identification of an Operator Anticipation on Marine Transport. Radio electronics, Computer science, Control. 2020. № 3 (54). P. 158–172. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-3-15>
75. Perviy B. A. Improving SGP4 orbit propagation. System technologies. 2019. Volume 6 (125). P. 76–81. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-6-125-2019-07>
76. Perviy B. A., Sarychev A. P. Influence of the Magnus Effect on the Spacecraft Lifetime. Системні технології. 2018. Випуск 2 (115). С. 20–31.
77. Pirozhenko A., Maslova A., Khramov D., Volosheniuk O., Mischenko A. Development of a new form of equations of disturbed motion of a satellite in nearly circular orbits. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 4, N 5 (106). P. 70–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.207671>
78. Sarychev A. P., Sarycheva L. V. GMDH-Based Optimal Set Features Determination in Discriminant Analysis. System technologies. 2019. Volume 6 (125). P. 26–40. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-6-125-2019-03>
79. Sarychev O. P., Perviy B. A. Autoregression models of large space debris motion. Системні технології. 2020. Випуск 6 (131). С. 137–148. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-6-131-2020-12>
80. Sarychev O. P., Perviy B. A. Autoregression models of space objects movement represented by TLE elements. Системні технології. 2020. Випуск 2 (127). С. 103–116. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-127-2020-08>
81. Sarychev O. P., Perviy B. A. Optimal regressors search subjected to vector autoregression of unevenly spaced TLE series. Системні технології. 2019. Випуск 2 (121). С. 95–110.
82. Sarychev O. P., Perviy B. A. Revealing changes in the space objects motion described by autoregressive models. Системні технології. 2021. Випуск 2 (133). С. 79–88. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-133-2021-09>
83. Senkin V. S., Syutkina-Doronina S. V. On the Issue of Choice of the Parameter Optimization Method for a Guided Missile, Science and Innovation. 2020. Volume 16(3). P. 50–64. <https://doi.org/10.15407/scine16.03.050>

Отримано 31.05.2021,
в остаточному варіанті 07.06.2021