

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ ОСТРОНАПРАВЛЕННОЙ АНТЕННЫ НА ЕГО ВИБРОАКТИВНОСТЬ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Ермаков В.Ю.

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
МАДИ, Ленинградский проспект, 64, Москва, 125319, Россия
e-mail: v_ermakov2003@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 22.05.2019

Описан подход к определению влияния различных алгоритмов управления приводом остронаправленной антенны на его виброактивность и пути улучшения динамической обстановки на борту космического аппарата, представлены результаты наземных и летных испытаний.

Ключевые слова: космический радиотелескоп, привод остронаправленной антенны, шаговый двигатель, система управления приводом, частотные испытания, перемещения «фазового центра», виброактивность, колебания упругого тела.

Современное состояние научно-технического, технологического и производственного потенциалов в любой стране мира в настоящее время оценивают по доле наукоемкой научно-технической продукции в промышленном производстве. Это связано прежде всего с тем, что такая продукция требует значительных объемов ресурсного обеспечения, включая финансовое, материально-техническое и кадровое.

К наукоемким производствам, как правило, относят отрасли, в которых доля расходов на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) составляет более 3,5%, а доля научного и производственного персонала — не менее 2,5%. В настоящее время одной из важнейших стратегических задач обеспечения устойчивого социально-экономического развития и обороноспособности России является повышение удельного веса наукоемкой продукции [1].

В соответствии с целями, предусматривается решение таких задач, как обеспечение качества, надежности и безопасности создаваемой ракетно-космической техники (РКТ), внедрение надежно-ориентированных технологий применения изделий РКТ [2], а также формирование технической ориентированного мышления [3]. Ретроспективный анализ формирования и эксплуатации сложных технических систем (СТС) различного

целевого назначения в России показал, что к данному направлению исследований относятся работы, которые обусловлены необходимостью создания перспективных автоматических космических аппаратов (КА) с высокоточным управлением угловым движением для решения различных целевых задач. Современные КА, как правило, имеют выносные конструкции малой жесткости, такие, как панели солнечных батарей (СБ), антенно-фидерные устройства (АФУ), элементы систем термостатирования (СТР) [4]. Внутри корпуса КА размещаются приборы и агрегаты специального назначения, технологических и служебных систем. Известно, что конструкции КА подвергаются вибрациям от внешних и внутренних источников возмущений как на Земле (при заводских испытаниях и транспортировках), так и при выводе на требуемую орбиту [5]. К особенностям нагружений КА на орбите следует также отнести низкочастотный спектр возмущений до десятков ньютонов с частотами от долей герца до сотен килогерц. На рабочих орбитах вибрации могут оказывать вредное влияние как на точность стабилизации и ориентации КА, так и на динамику движения его центра масс, включая различного рода орбитальные маневры. В режиме прецизионной ориентации чувствительные элементы системы управления ориентацией и стабилизацией (СУОС) КА типа

«Спектр-Р» (рис. 1) совершают упругие колебания относительно своего нейтрального положения [6].

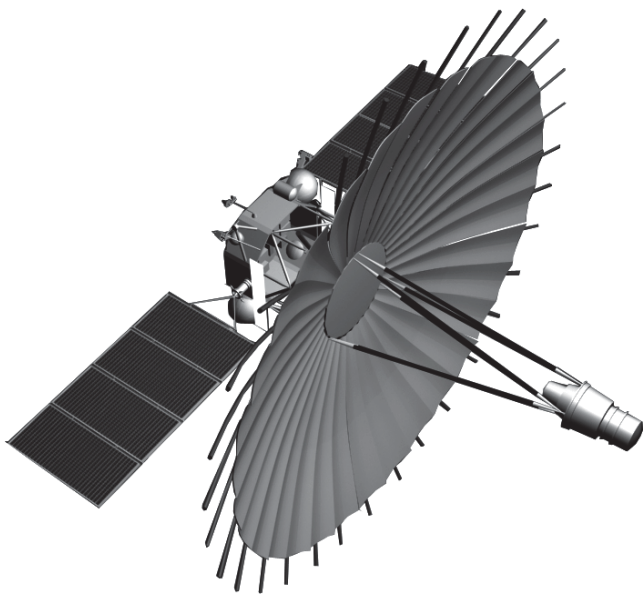


Рис. 1. Космический аппарат типа «Спектр-Р»

Эти колебания обусловлены конструктивными особенностями сборки телескопов на ферме их крепления. В процессе функционирования КА, внутренние возмущения, создаваемые, например, работой привода остронаправленной антенны (ОНА), приводят к возникновению упругих колебаний конструкции и, как следствие, посадочного места крепления гироскопического интегратора вектора угловых скоростей (ГИВУС) [7]. Наведение ОНА должно производиться и на участках трехосной стабилизации, и на участках переориентации КА при смене исследуемого источника наблюдений.

Требуемая угловая скорость разворотов приводов ОНА изменяется в диапазоне от $0.005^\circ/\text{с}$ в районе апогея рабочей орбиты до $0.1...0.15^\circ/\text{с}$ при переориентации КА и в районе перигея рабочей орбиты. Логика алгоритма работы привода ОНА такова, что навигационную задачу бортового комплекса управления формируют требуемые углы наведения ОНА на пункте приема научной информации (ППНИ) в координатах привода ОНА по данным о векторе состояния КА, координатах ППНИ и угловой ориентации КА [8].

Данные о текущих углах разворота формируются бортовым комплексом управления на основании информации о количестве управляющих импульсов, выданных блоком управления привода ОНА или по информации, поступающей с датчика

угла. Далее формируется разность между текущими и требуемыми углами разворота осей привода ОНА, которые заданы в полетном задании. В случае достижения значений «порога» на борту КА производится обработка приводом двойного значения «порога» рассогласования [9]. Пороговое значение углов разворота осей привода ОНА изменяется в зависимости от участка орбиты (близости КА к Земле) и может составлять в районе апогея $2...3$ угл. мин, а в районе перигея $10...15$ угл. мин, что соответствует времени работы ОНА $0.5...1$ с в районе перигея и до $10...15$ мин в районе апогея на рабочей орбите КА [10].

Во время проведения сеансов наблюдения на борту КА могут возникать механические возмущения, которые обусловлены работой агрегатов, имеющих несбалансированные движущиеся массы, что может повлиять как на точность ориентации самого КА, так и на элементы научной аппаратуры (НА), которые могут снизить качество регистрируемой информации, внести существенные погрешности в измерения углового положения КА, получаемые СУОС, что, в свою очередь, может привести к невозможности выполнения основной целевой задачи КА [11, 12].

Систематически и целенаправленно учет влияния внутренних источников возмущения на точность стабилизации и на работу НА не проводился. Поэтому, как правило, на борт КА приводы и аппаратура, имеющая вращающиеся массы, устанавливались без надлежащего контроля виброактивности [13, 14].

Из-за недопонимания актуальности указанных вопросов для современных информационных КА проблема не только не разрабатывалась, но и не была поставлена достаточно полно в научном и практическом плане [15, 16].

Во многих случаях для борьбы с нежелательными вибрациями конструкции КА более целесообразно не рассеивать энергию остаточных колебаний, а уменьшать уровень возмущения или модифицировать его характер таким образом, чтобы избежать резонансных явлений и, следовательно, не допустить высоких амплитуд колебаний [17]. Для практической реализации этого подхода рассмотрим возможность снижения уровня виброактивности электромеханических приводных устройств путём подбора рациональных алгоритмов управления ими по критерию обеспечения минимума амплитудных значений внутренних возмущений, влияющих на прецизионную аппаратуру КА. Привод, который был установлен на КА, ра-

ботает с постоянной частотой управляющих импульсов шагового двигателя (ШД), равной 130 с^{-1} , эквивалентная угловая скорость поворота антенны определяется величиной пачки импульсов и периодом цикла следования указанных пачек. Результаты моделирования динамического поведения КА при повороте ОНА на угол 6 угл. мин со скоростью $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$ и периодом 1 с относительно неподвижной оси вращения представлены на рис. 2.

влияния использования различных алгоритмов управления приводом ОНА на его виброактивность проведен обобщающий анализ данных, полученных при имитационном моделировании динамики КА и динамических испытаниях. Ниже приводятся результаты, полученные в процессе наземных испытаний балки высокоинформативного радиокомплекса (ВИРК) КА типа «Спектр-Р» (рис. 3). На привод была установлена антенна, изготовленная по штатной технологии [18].

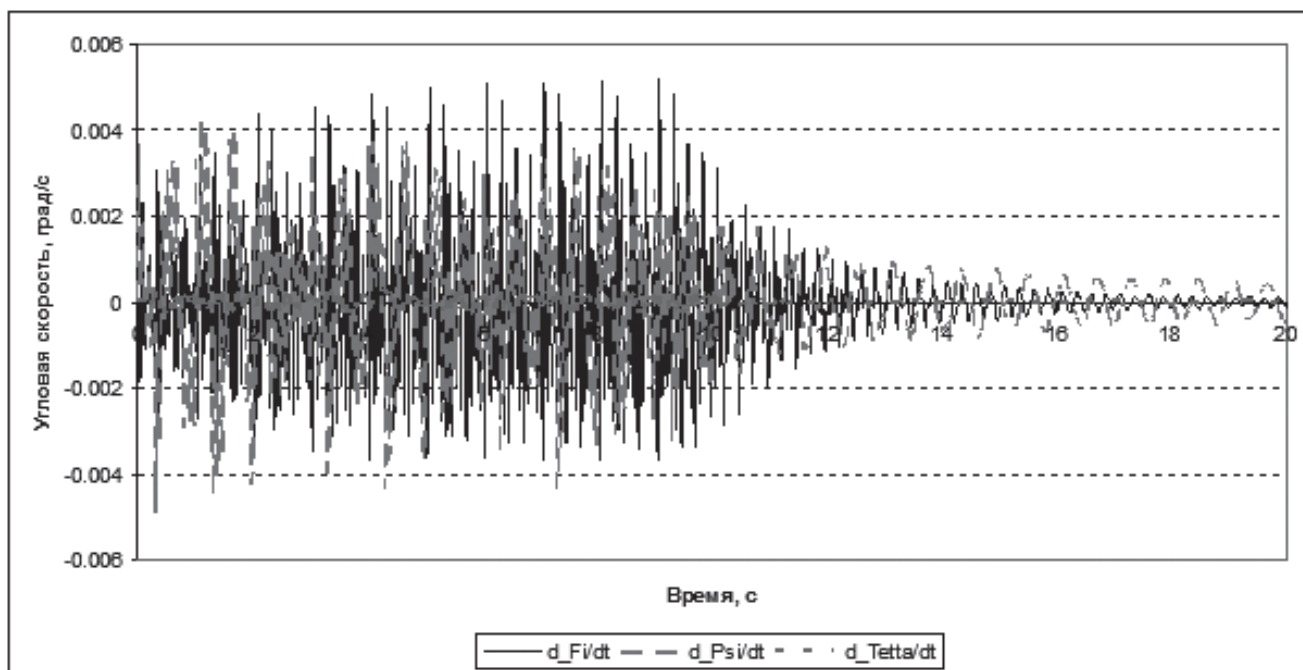


Рис. 2. Поведение космического аппарата при повороте привода остронаправленной антенны

Критерием, по которому будем определять эффективность рассматриваемого подхода, выберем амплитуду перемещения «фазового центра» (ФЦ) ОНА в направлении ее электрической оси. Для обеспечения качественного процесса передачи на землю научной информации перемещение ФЦ не должно превышать $0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ [18].

Для поиска рационального с точки зрения минимизации уровней механических воздействий на КА алгоритма управления приводом ОНА было рассмотрено несколько вариантов: импульсный (который был) режим управления (частота ШД 130 с^{-1} , угловая скорость определяется величиной пачки импульсов и периодом цикла) и предполагаемые (разработанные впервые): частотный режим (угловая скорость определяется частотой следования импульсов) и антирезонансный режим — импульсный режим с наложением определенной зависимости на соотношение величины пачки импульсов и длительности цикла. Для определения

Целью испытаний являлось определение перемещений ФЦ ОНА при различных режимах управления ШД. Данные, полученные в процессе эксперимента, подтверждают результаты математического моделирования для вариантов работы системы управления приводом в различных режимах (рис. 4).

Анализ полученных результатов сравнения позволяет сделать заключение о том, что переход на частотный либо антирезонансный режим управления работой привода ОНА позволят уменьшить перемещения ФЦ до заданного уровня.

Кроме того, следует заметить, что применение частотного режима управления позволит уменьшить уровни перемещений ФЦ более чем на порядок ниже требуемых и позволяет рекомендовать с точки зрения минимизации амплитуд перемещения ФЦ частотный режим управления с шагом 8 с^{-1} . Этот алгоритм был внедрен и использовался на КА типа «Спектр-Р», и при этом задачи, стоящие при эк-

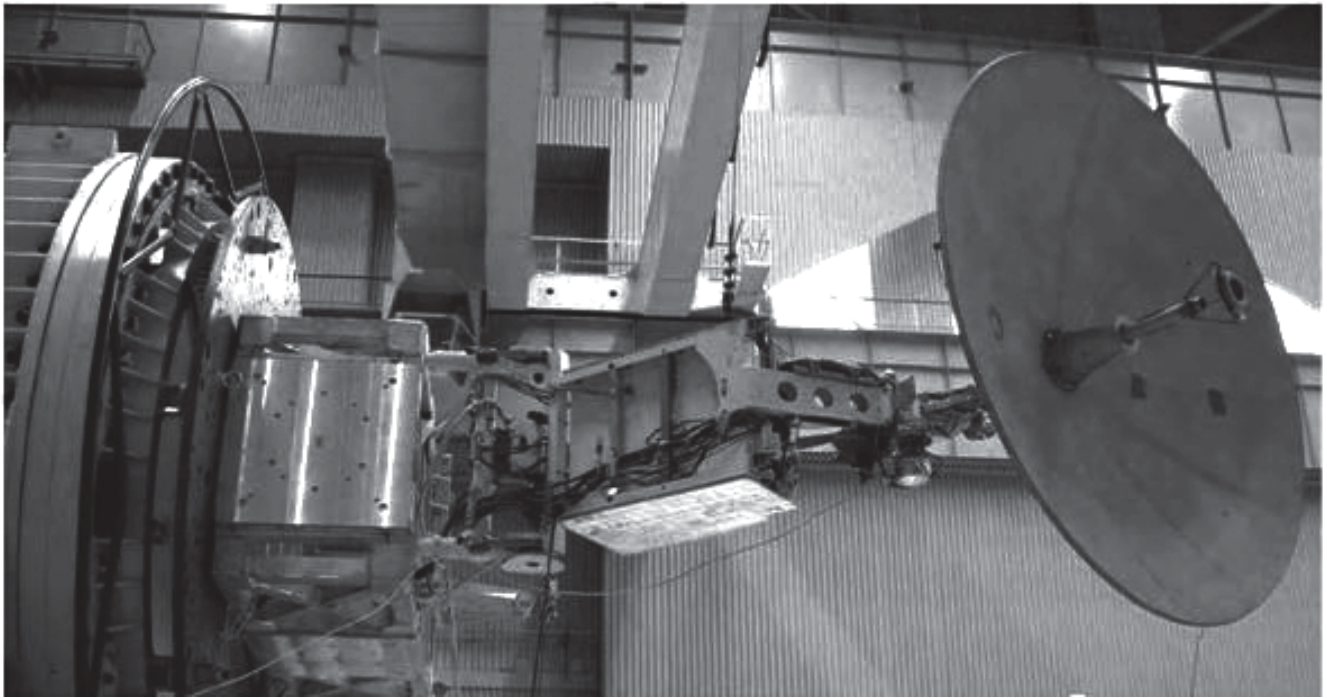


Рис. 3. Экспериментальная установка по определению виброактивности привода остронаправленной антенны

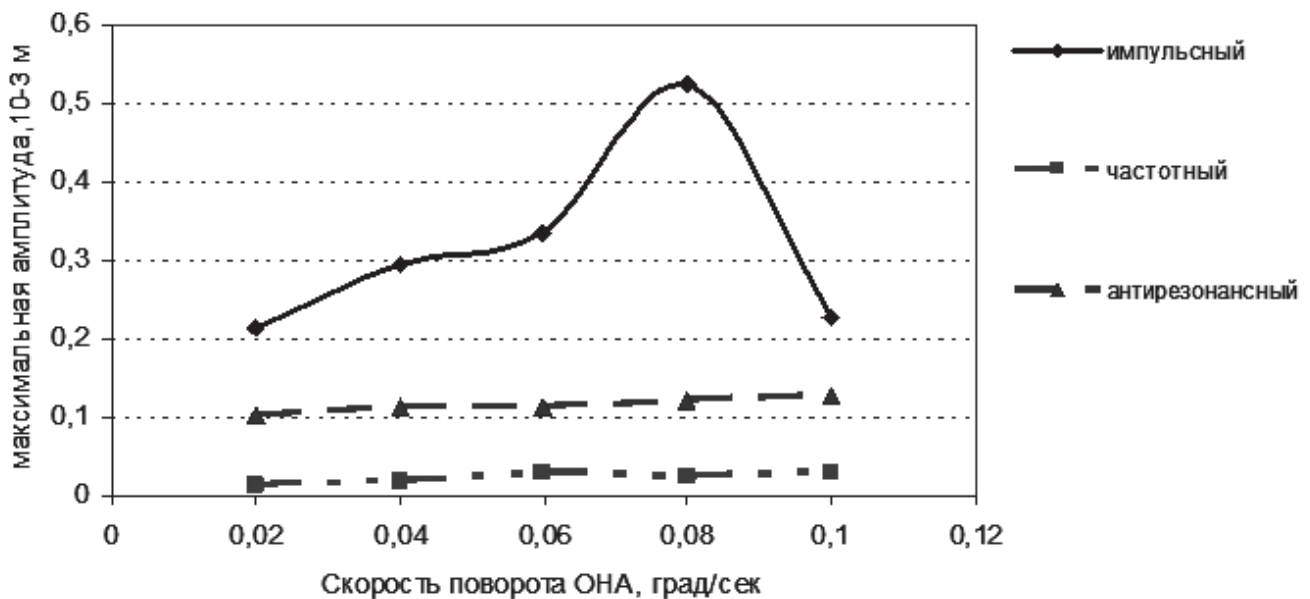


Рис. 4. Перемещения фазового центра при работе привода остронаправленной антенны в различных режимах

сплуатации КА типа «Спектр-Р», в целях изучения галактик и квазаров в радиодиапазоне; изучения структуры и динамики районов, прилегающих к массивным черным дырам; исследования нейтронных звезд в нашей Галактике; измерения и оценки расстояний и скоростей пульсаров и других галактических источников; изучения структуры межзвездной плазмы и эволюции компактных внегалактических источников, были выполнены

[20]. В частности, КА «Спектр-Р» исследовал десятки массивных объектов на расстоянии миллиардов световых лет от Земли и работает в связке с наземными телескопами, установленными на разных континентах, образуя так называемый интерферометр, т.е. единую антенну с диаметром 350 тыс. км (рис. 5), в том числе для изображения центра галактики VL Lacertae с экстремальным угловым разрешением в 20 микросекунд дуги, а

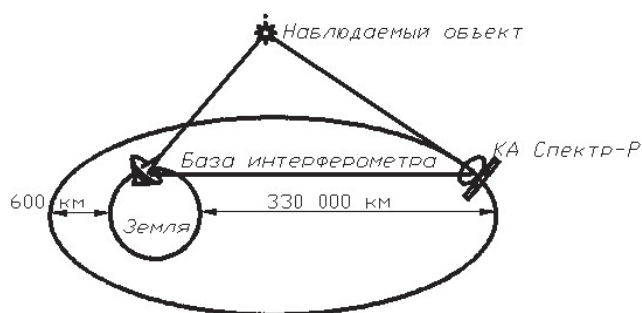


Рис. 5. Схема эксплуатации космического аппарата «Спектр-Р»

также обнаружения ударных гравитационных волн и спирального магнитного поля в основании джета галактики.

С помощью российской космической обсерватории учёные получили научные данные и объявили об открытии экстремальной яркости ядра квазара 3C273 в созвездии Девы (квазар имеет температуру от 10 до 40 триллионов градусов, что примерно в десять раз выше значений, которые допускает теория астрофизических явлений). Кроме того, высокое разрешение целевой бортовой аппаратуры КА типа «Спектр-Р» позволило с помощью квазара 3C273 получить «рентгеновский снимок» нашей Галактики.

В изображении этого квазара удалось выявить неоднородности — яркие «пятнышки», которые появились при прохождении излучения сквозь межзвездную среду Млечного Пути.

За время своего существования КА типа «Спектр-Р» установил несколько мировых рекордов:

- стал самым масштабным научным инструментом в истории человечества, основанным на использовании инновационных космических технологий;

- превзошел мировые достижения по угловому разрешению поля обзора, которое зафиксировано на уровне 7 миллионных доли секунды дуги;

- база интерферометра составляет 340 тыс. км.

Все данные, получаемые с радиотелескопов, помечаются временными метками и синхронизируются. Угловое разрешение полученного интерферометра формируется расстоянием между телескопами [21, 22]. В данном случае оно вычисляется до апогея — самой удаленной от Земли точки на орбите КА типа «Спектр-Р» [23]. Такая система обеспечивает уникальное разрешение поля зрения (возможность рассмотреть два близких объекта) при наблюдениях, равное миллионным долям угловой секунды.

Выводы

Использование частотного режима управления с шагом 8 с^{-1} позволяет уменьшить уровни перемещений почти в пять раз. Кроме того, максимальные зарегистрированные амплитуды перемещений «фазового центра» в два раза ниже значений, указанных в техническом задании на КА типа «Спектр-Р» ($0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$), что и было подтверждено при функционировании КА типа «Спектр-Р», на котором было получено высокое угловое разрешение радиотелескопа — 7 микросекунд дуги при базе 340 000 км.

Библиографический список

1. Брейсуэлл Р.И. Теория допусков для больших антенн // Зарубежная радиоэлектроника. 1962. № 3. С. 18–25.
2. Гапоненко О.В., Гаврин Д.С., Свиридова Е.С. Анализ структуры стратегических планов развития ракетно-космической промышленности методом классификации НИОКР космических функциональных и промышленных технологий // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 64–81.
3. Димов Н.Ф. Апертурный синтез астрономических телескопов // Оптический журнал. 1985. № 12. С. 32–38.
4. Лебедева Н.В., Соловьев С.В. Использование интеллектуальных систем при оперативном управлении полётом космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 152–159.
5. Васильев В.Н. Системы ориентации космических аппаратов. — М.: НПП ВНИИЭМ, 2009. — 310 с.
6. Вибрация в технике: Справочник в 6 томах. Т. 6. Защита от вибраций и ударов / Под ред. К.В. Фролова. — М.: Машиностроение, 1981. — 456 с.
7. Мануйлов Ю.С. Метод логико-аналитического синтеза в задачах оптимального и адаптивного управления. — Л.: МО СССР, 1986. — 188 с.
8. Ермаков В.Ю., Теленев П.П. Проектирование устройств гашения колебаний конструкции космических аппаратов // Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2013. С. 398–429.
9. Научные основы космического производства / Под ред. В.С. Авдеевского. — М.: Мир, 1984. — 173 с.
10. Николаев Ю.Л., Ершов А.Г. Автоматизированный отсчетный механизм микроперемещений // Измерительная техника. 1990. № 2. С. 16–17.
11. Рыбак Л.А., Синев А.В., Пашков А.И. Синтез активных систем виброизоляции на космических объектах. — М.: Янус-К, 1997. — 160 с.
12. Ashley H. On Passive Damping Mechanisms in Large Space Structures // Journal of Space and Rockets. 1984. Vol. 21. No. 5, pp. 448–455. DOI: 10.2514/3.25679

13. *Nashif A.D., Jones D.I.G., Henderson J.P.* Vibration Damping. — John Wiley & Sons, New York, 1985. — 480 p.
14. *Joshi S.M., Groom N.J.* Modal Damping Enhancement in Large Space Structures Using AMCD's // *Journal of Guidance and Control*. 1980. Vol. 3. No. 5, pp. 477-479.
15. *Hyde T.T., Crawley E.F.* H2 Synthesis for Active Vibration Isolation // *American Control Conference*, Seattle. Washington., 1995. Vol. 5. DOI: 10.1109/ACC.1995.533858
16. *Zhu R., Misra A.K., Modi V.J.* Dynamics and Control of Coupled Orbital and Librational Motion of Tethered Satellite Systems // *Journal of the Astronautical Sciences*. 1994. Vol. 42. No. 3, pp. 319–342.
17. *Telepnev P.P., Efanov V.V., Kuznetsov D.A., Ermakov V.Yu.* Analysis of SPEKTR-R Spacecraft Operating Modes for Various Algorithms of High Gain Antenna Drive Control // *Solar System Research*. 2015. Vol. 49. No. 7, pp. 610-613.
18. *Ермаков В.Ю., Телепнев П.П., Ефанов В.В., Кузнецов Д.А.* Анализ режимов работы космического аппарата «СПЕКТР-Р» для различных алгоритмов управления приводом остронаправленной антенны // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2014. № 3(24). С. 100-103.
19. *Ермаков В.Ю., Ефанов В.В., Клишев О.П., Кузнецов Д.А., Телепнев П.П.* Новый способ снижения вибровозмущений целевой аппаратуры на борту прецизионных космических аппаратов // *Космонавтика и ракетостроение*. 2014. № 6(79). С. 80 -85.
20. *Донсков А.В., Мишурова Н.В., Соловьев С.В.* Автоматизированная система контроля состояния космического аппарата // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25. № 3. С. 151-160.
21. *Cosmo M.L., Lorenzini E.C.* Tethers in Space Handbook. — 3rd ed. — NASA, Washington DC, Marshall Space Flight Center, Huntsville, 1997. — 241 p.
22. *Vargo L.G.* Orbital patterns of satellite systems // *The Journal of the Astronautical Sciences*. 1960. Vol. 7. № 4, pp. 78-86.
23. *Донсков А.В.* Анализ современных методов оценки и моделирования рисков возникновения нештатных ситуаций на борту космического аппарата // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25. № 4. С. 163-169.

STUDYING THE EFFECT OF THE BEAM AERIAL DRIVE CONTROL ALGORITHM ON ITS VIBRATION ACTIVITY ONBOARD A SPACECRAFT

Ermakov V.Yu.

*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University,
MADI, 64, Leningradskiy prospekt, Moscow, 125319, Russia
e-mail: e-mail: v_ermakov2003@mail.ru*

Abstract

Modern space vehicles (SV), as a rule, include bearing-out structures of slight rigidity. These are solar batteries, antenna-feeder devices, elements of thermal conditioning systems. Actuators and special purpose units, as well as units of technological and support systems are being placed inside the SV hull. SVs are exposed to vibrations from the external and internal perturbation sources both on Earth and in orbit. The feature of the SV loading in orbit is low-force spectrum of perturbances up to tens of Newtons with frequencies from fractions of hertz to hundreds of kilohertz. Vibrations may have deleterious effect upon both orientation and stabilization accuracy, and movement dynamics including various types of orbital maneuvering. These perturbances might be created, for example, by operation of the narrow-beam aerial (NBA) drive, which leads to occurrence of elastic vibrations of the structure and mounting faces of the

precise equipment. While the observation session onboard an SV, mechanical disturbances, stipulated by operation of aggregates with non-balanced masses, may occur. This may affect both the orientation accuracy of the SV itself and equipment elements which may degrade the quality of the registered information, and introduce significant error to the SV angular position measurements, obtained by the orientation and stabilization control system. This, in turn, may make the SV mission target task performance impossible. To reduce these perturbances an algorithm for the NBA drive operation for the “Spectr-R” type SV was developed. Dynamic analysis of data obtained for the suggested algorithm and conventional was performed. Positive results of the suggested algorithm, tested on the “Spectr-R” type SV are demonstrated.

Keywords: space radio-telescope, drive of narrow-beam aerial, foot-space engine, control system by a drive, frequency tests, moving of “phase center”, vibroactivity, vibrations of resilient body.

References

1. Breisuell R.I. *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1962, no. 3, pp. 18–25.
2. Gaponenko O. V., Gavrin D. S., Sviridova E. S. Structure analysis of the strategic plans of the space-rocket industry development by method of space functional and industrial technologies R&D classification. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 64-81.
3. Dimov N.F. *Opticheskii zhurnal*, 1985, no. 12, pp. 32-38.
4. Lebedeva N. V., Solov'ev S. V. Intelligent systems application while spacecraft flight operational control. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 152-159.
5. Vasil'ev V.N. *Sistemy orientatsii kosmicheskikh apparatov* (Systems of orientation of space vehicles), Moscow, NPP VNIIEI, 2009, 310 p.
6. *Vibratsiya v tekhnike: Spravochnik v 6 tomakh. T. 6. Zashchita ot vibratsii i udarov* (Vibration in engineering: Handbook in 6 volumes. Vol. 6. Protection against vibration and shock), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 456 p.
7. Manuilov Yu.S. *Metod logiko-analiticheskogo sinteza v zadachakh optimal'nogo i adaptivnogo upravleniya* (Method of logician-analytical synthesis is in the tasks of optimal and adaptive management), Leningrad, MO SSSR, 1986, 188 p.
8. Ermakov V.Yu., Telepnev P.P. *Proektirovanie avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamental'nykh nauchnykh issledovaniy. Sborik statei*, Moscow, MAI-PRINT, 2013, pp. 398-429.
9. Avduevskii V.S. *Nauchnye osnovy kosmicheskogo proizvodstva* (Scientific bases of space production), Moscow, Mir, 1984, 173 p.
10. Nikolaev Yu.L., Ershov A.G. *Izmeritel'naya tekhnika*, 1990, no. 2, pp. 16-17.
11. Rybak L.A., Sinev A.V., Pashkov A.I. *Sintez aktivnykh sistem vibroizolyatsii na kosmicheskikh ob'ektakh* (Synthesis of the active systems of vibroisolation on space objects), Moscow, Yanus-K, 1997, 160 p.
12. Ashley H. On Passive Damping Mechanisms in Large Space Structures. *Journal of Space and Rockets*, 1984, vol. 21, no. 5, pp. 448-455. DOI: 10.2514/3.25679
13. Nashif A.D., Jones D.I.G., Henderson J.P. *Vibration Damping*. John Wiley & Sons, New York, 1985, 480 p.
14. Joshi S.M., Groom N.J. Modal Damping Enhancement in Large Space Structures Using AMCD's. *Journal of Guidance and Control*, 1980, vol. 3, no. 5, pp. 477-479.
15. Hyde T.T., Crawley E.F. H2 Synthesis for Active Vibration Isolation. *American Control Conference*, Seattle, Washington, 1995. Vol. 5. DOI: 10.1109/ACC.1995.533858
16. Zhu R., Misra A.K., Modi V.J. Dynamics and Control of Coupled Orbital and Librational Motion of Tethered Satellite Systems. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1994, vol. 42, no. 3, pp. 319–342.
17. Telepnev P.P., Efanov V.V., Kuznetsov D.A., Ermakov V.Yu. Analysis of SPEKTR-R Spacecraft Operating Modes for Various Algorithms of High Gain Antenna Drive Control. *Solar System Research*, 2015, vol. 49, no. 7, pp. 610-613.
18. Ermakov V.Yu., Telepnev P.P., Efanov V.V., Kuznetsov D.A. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2014, no. 3(24), pp. 100-103.
19. Ermakov V.Yu., Efanov V.V., Klishev O.P., Kuznetsov D.A., Telepnev P.P. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2014, no. 6(79), pp. 80-85.
20. Donskov A.V., Mishurova N.V., Solov'ev S.V. Automated system for space vehicle status monitoring. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 151-160.
21. Cosmo M.L., Lorenzini E.C. *Tethers in Space Handbook*. 3rd ed. NASA, Washington DC, Marshall Space Flight Center, Huntsville, 1997, 241 p.
22. Vargo L.G. Orbital patterns of satellite systems. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1960, vol. 7, no. 4, pp. 78-86.
23. Donskov A.V. Analysis of modern evaluation and modeling methods of contingencies occurrence risks onboard a spacecraft. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 163-169.