

Анализ возможности возникновения детерминированного хаоса в космическом летательном аппарате с гиродемпферами для дистанционного зондирования земной поверхности

В.М. Панкратов¹, М.А. Барулина¹, А.В. Голиков¹, Е.В. Панкратова¹

¹Институт проблем точной механики и управления РАН, Рабочая 24, Саратов, Россия, 410028

Аннотация. Цель работы заключается в моделировании и анализе колебаний по тангажу космического летательного аппарата, осуществляющего дистанционное зондирование земной поверхности, с точки зрения возможности возникновения детерминированного хаоса в процессе успокоения собственных колебаний относительно центра масс летательного аппарата. В работе построена нелинейная математическая модель колебаний космических летательных аппаратов дистанционного зондирования поверхности Земли с поплавковыми гиродемпферами со встроенной системой терморегулирования на элементах Пельтье. Результаты компьютерных экспериментов с использованием разработанной библиотеки моделей температурных возмущений показали, что при некоторых критических значениях параметров рассматриваемой системы возможно возникновение детерминированного хаоса. Получены фазовые портреты при переходе движения космического летательного аппарата по тангажу от регулярных колебаний к хаотическим. Построены области детерминированного хаоса, как функции параметров систем с гиродемпферами и характеристик температурных и механических внешних возмущений.

1. Введение

Исследование и анализ различных физических процессов, протекающих в современных приборах авиакосмического назначения, на сегодняшний день остается важной и актуальной задачей. Например, температурные возмущения наряду с другими факторами оказывают существенное влияние на эффективность работы, надежность и долговечность приборов рассматриваемого класса, а также отдельных устройств и их электронных компонентов [1-10]. Поэтому для уменьшения влияния температурных воздействий на прибор, предусматривается использование различных типов систем терморегулирования – как пассивных, так и активных, например, на основе термобатарей Пельтье. Но использование систем терморегулирования, в свою очередь, может привести к появлению нежелательных эффектов, таких как, явление детерминированного хаоса. И это может привести к потере работоспособности некоторых типов приборов, например, спутников Земли.

Целью данной работы является исследование движения по тангажу космического летательного аппарата (КЛА) дистанционного зондирования поверхности Земли с поплавковыми гиродемпферами (гироскомплекс).

При проектировании, испытаниях, аттестации и эксплуатации сложных прецизионных систем навигации, ориентации, стабилизации и управления прецизионными системами с гироскопическими успокоителями собственных колебаний существует необходимость поддержания диссипативных свойств гироскопов стабильными, в том числе путем максимального снижения влияния на эффективность их работы внешних возмущающих факторов. К таким факторам относятся температурные. Это обстоятельство особенно важно, так как вязкие свойства рабочих демпфирующих жидкостей существенно зависят от температуры. Одним из способов решения такой задачи является применение систем терморегулирования в узле взаимного демпфирования на основе использования термоэлементов Пельтье.

Однако, существенные нелинейные свойства таких систем терморегулирования, с одной стороны, и температурно-возмущенных уравнений, описывающих динамику движения системы "гироскоп - КЛА", с другой стороны, требуют детального исследования с точки зрения возможного возникновения в них нерегулярных неустойчивых режимов и, в частности, феномена детерминированного хаоса. Исследование такого феномена представляет особый интерес для космических летательных аппаратов длительного срока функционирования на орбите.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- обобщен опыт авторов и других ученых [1,6,7,9,13,18,19] по математическому моделированию как датчиков и их компонентов, так и сложных механико-электронных систем;
- выполнена реализация нелинейной математической модели КЛА с температурно-возмущенными гироскопами для космических летательных аппаратов с гироскопированием в специализированном программном обеспечении;
- исследован феномен возможного возникновения детерминированного хаоса при движении по круговой орбите вокруг Земли космического летательного аппарата с гироскопированием в условиях температурных и механических возмущений гармонического характера.

Для решения поставленных задач были применены методы анализа нелинейных динамических систем, методы аналитического и численного исследования условий возникновения детерминированного хаоса, метод элементарных балансов для гироскопических сложных систем с инерционными, диссипативными, потенциальными силами в условиях характерных температурных возмущений систем управления навигацией, ориентацией и стабилизацией изделий космического назначения.

2. Математическая модель.

В последние десятилетия, благодаря проведенным теоретическим исследованиям и использованию быстродействующих компьютеров, было доказано [19], что и сравнительно "простые" системы, описываемые, например, небольшим числом детерминированных (не содержащих случайно изменяющихся параметров или воздействий) обыкновенных, но нелинейных дифференциальных уравнений, могут породить нерегулярное (хаотическое) поведение таких систем.

Схема КЛА с демпфирующим устройством на поплавковых гироскопах "V - крен", описанная в [20] показана на рисунке 1.

Рассмотрим, без ограничения общности, канал успокоения собственных колебаний КЛА по углу тангажа θ . гравитационного космического летательного аппарата [7].

Полученные нелинейные уравнения возмущенного движения системы "гироскоп - КЛА" в этом случае [21] имеют вид:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} + a_1 \sin \theta - a_2 \dot{\beta} = B \cos \omega t, \\ \eta_T \dot{\beta} + a_4 \sin \beta + a_3 \dot{\theta} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где: $a_1 = 3w_0^2 (J_x - J_z) / J_y$ - параметр, определяющий конфигурацию КЛА;
 $a_2 = Hd / J_y$; $a_3 = 2Hd$; $a_4 = Hw_0 S$; H - кинетический момент роторов гироскопов;

J_x, J_y, J_z - моменты инерции КЛА; ω_0 - угловая орбитальная скорость; $d = \cos \epsilon$, $S = \sin \epsilon$ - параметры взаимного углового расположения векторов кинетических моментов роторов гироскопов относительно системы координат, жестко связанной с объектом; $b = b_1 - b_2$; $h_T = h + 2h_s(T_1)$; h - коэффициент демпфирования гиродемпферов в зазорах между поплавком и корпусом; $h_s(T_1)$ - дополнительный, зависящий от температуры, коэффициент демпфирования в узле взаимного демпфирования; B, ω - амплитуда и частота внешнего механического воздействия на КЛА.

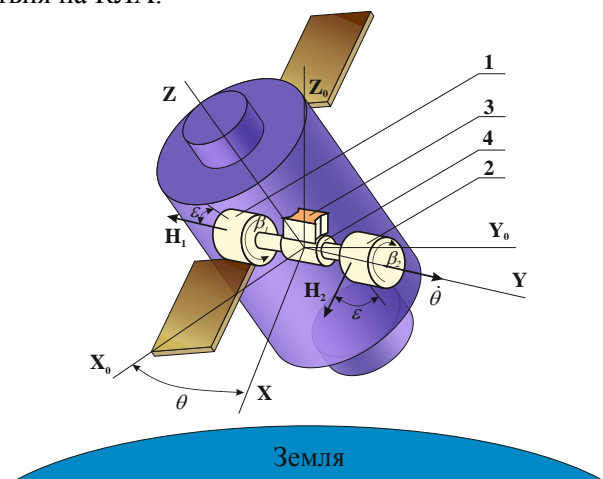


Рисунок 1. Схема системы “гирокомплекс - КЛА” с узлом взаимного демпфирования: X_0, Y_0, Z_0 - орбитальная система координат; X, Y, Z - система координат связанная с КЛА; 1, 2 - поплавки гиродемпферов; 3 - термоэлектрические элементы Пельтье; 4 - узел взаимного демпфирования; H_1, H_2 - кинетические моменты роторов гироскопов.

Подсистема гиродемпферов может быть представлена (в силу наличия жидкости в узле взаимного демпфирования и на основе метода элементарных балансов) теплообменом между двумя элементарными объемами. Первый соответствует внутреннему спаю термобатареи, контактирующему с узлом взаимного демпфирования. Второй соответствует наружному спаю термобатареи, контактирующему с окружающей средой.

Тогда система уравнений теплообмена, полученная с использованием метода элементарных балансов, запишется в виде:

$$c\dot{T}_1 + q(T_1 - T_2) = Q_1, \quad (2)$$

$$c\dot{T}_2 + q(T_2 - T_1) + q_c(T_2 - T_c) = Q_2, \quad (3)$$

где Q_1, Q_2 - мощности источников тепловыделения (хладопроизводства) на спаях термобатареи Пельтье.

Зависимость коэффициента демпфирования от температуры при неизменных геометрических параметрах узла взаимного демпфирования определяется зависимостью от температуры коэффициента динамической вязкости рабочей жидкости.

Эта зависимость может быть представлена в виде:

$$h_s(T_1) = h_s^0 \frac{m(T_1)}{m^0}, \quad (4)$$

где: h_s^0, m^0 - номинальные значения коэффициента демпфирования и коэффициента динамической вязкости рабочей жидкости для линейного режима вынужденных колебаний КЛА при дистанционном сканировании земной поверхности по программе полета.

Закон регулирования температуры с идеальным термодатчиком, расположенным на внутреннем спае 1 (рисунок 1) термобатареи Пельтье:

$$J = \begin{cases} J_{max}, & \text{при } T_1 - T_z \geq T_L \\ \text{tg}\alpha(T_1 - T_z), & \text{при } -T_L \leq T_1 - T_z \leq T_L \\ -J_{max}, & \text{при } T_1 - T_z \leq -T_L. \end{cases} \quad (5)$$

Существенная нелинейность построенной математической модели обусловлена как принципом работы термобатарей Пельтье и видом закона регулирования температуры (5), так и нелинейностью уравнений движения (1) системы “Гиродемпфер - КЛА” и соотношений (2) -(5), выражающих связь между коэффициентом демпфирования, температурой и вязкостью рабочей жидкости в зазорах между поплавком и корпусом гиродемпфера.

Для компьютерного моделирования было создано программное обеспечение (рисунок 2), реализующее математическую модель температурно-возмущенной динамической системы гирокомплекс - КЛА (1)-(5) и использующее разработанную авторами библиотеку моделей температурных возмущений [16].

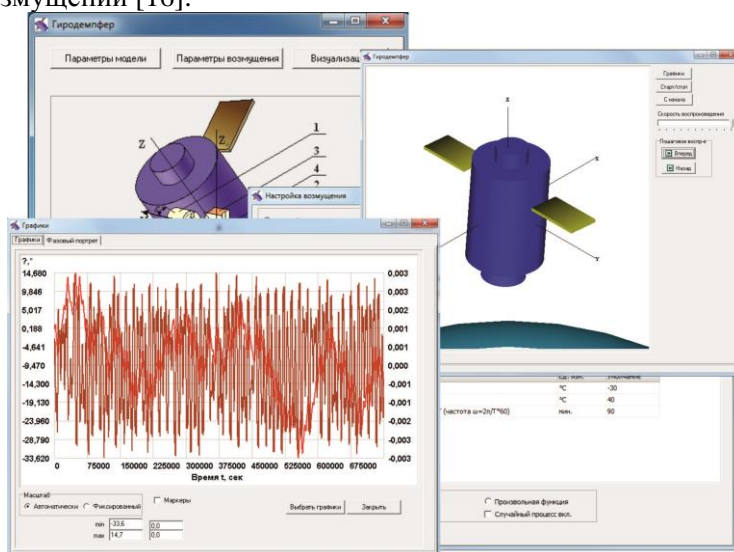


Рисунок 2. Диалоговые окна программного обеспечения.

Моделирование было проведено для системы “гирокомплекс - КЛА” со следующими характеристиками [20], имеющими следующие значения: $J_x = 25 \text{ кН}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$, $J_y = 23,5 \text{ кН}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$, $J_z = 9 \text{ кН}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$, $H = 0,01 \text{ кН}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, $\omega_0 = 0,00102 \text{ с}^{-1}$, $\varepsilon = 39,8^0$.

В соответствии с проведенными аналитическими исследованиями на рисунке 3 приведены построенные области возможного существования детерминированного хаоса [19], [22] в плоскости параметров “частота вынуждающей силы - температура”.

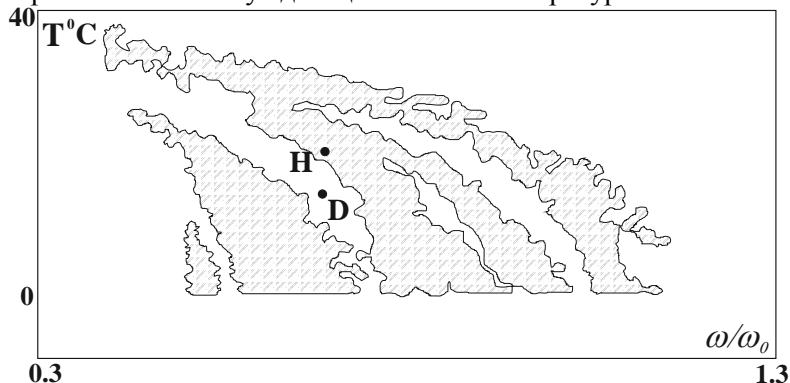


Рисунок 3. Области возможного существования детерминированного хаоса Н и области гармонического характера колебаний D в режиме вынужденного сканирования КЛА по тангажу ($B \approx a_1$).

Графики колебаний и эволюции фазового портрета $(\theta, \dot{\theta})$ при переходе из регулярной области (точка D на рисунке 3 с параметрами $T = 13^\circ\text{C}$, $w = 0,7w_0$) в область детерминированного хаоса (точка H на рисунке 3 с координатами $T = 19^\circ\text{C}$, $w = 0,7w_0$) показаны на рисунке 4.

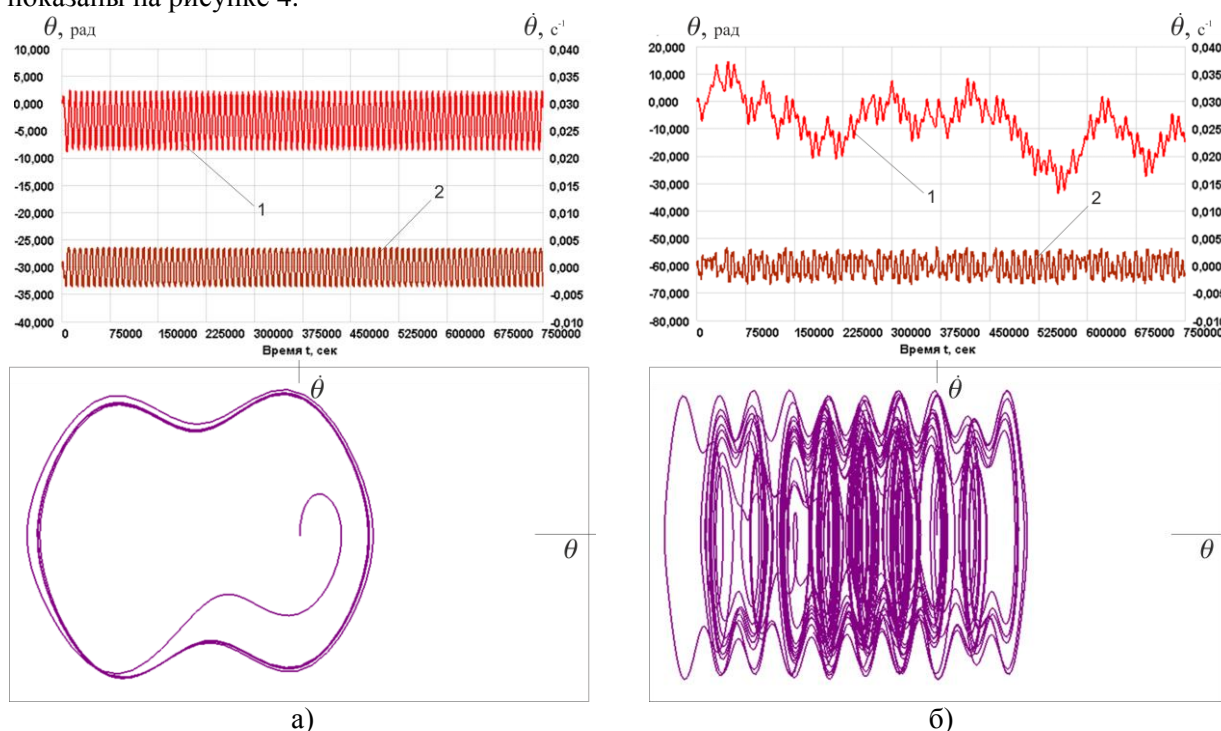


Рисунок 4. Эволюция фазового портрета при переходе системы “Гиродемпфер - КЛА” из регулярной области (а) ($T = 13^\circ\text{C}$) к хаосу (б) ($T = 19^\circ\text{C}$) в режиме вынужденного сканирования КЛА по тангажу. 1- угол θ , 2 – угловая скорость $\dot{\theta}$.

Таким образом, можно сделать вывод, что при некотором критическом значении амплитуды приведенной вынуждающей силы (в нашем случае $B \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-2}$), определенных частотах (например $\omega = 0,7\omega_0$) и температурах в узле взаимного демпфирования (например $T = 19^\circ\text{C}$) **возможно возникновение детерминированного хаоса** в движении КЛА по тангажу.

Все качественные и количественные критерии хаоса выполняются.

При этом, корреляционная размерность странного аттрактора составляет $\approx 2,3$; энтропия Колмогорова $K = \text{const} \approx 0,15$.

3. Выводы

В результате работы построена нелинейная математическая модель движения по тангажу космического летательного аппарата дистанционного зондирования поверхности Земли с гиродемферами и системой терморегулирования на элементах Пельтье в узле взаимного демпфирования.

В ходе работы было создано специализированное ПО, к основным плюсам которого можно отнести отсутствие необходимости приобретения дорогостоящих пакетов программного обеспечения для автоматизированного проектирования и моделирования (Simulink, ANSYS и т.п.). Кроме того, функции специализированного ПО полностью отвечают потребностям исследователя. Так, например, такое ПО может предоставлять возможность наблюдать в динамике с течением времени протекающие в исследуемом объекте физические процессы (механическое движение, тепловые процессы и т.д.), иметь функции построения трехмерных топограмм температурных полей различных конструктивных элементов, например, плат

электроники, вывод графиков температур в расчетных точках объекта, сохранения протокола расчета в текстовый файл для дальнейшей обработки и анализа полученных результатов.

При помощи разработанного ПО была исследована компьютерная модель движения по тангажу КЛА дистанционного зондирования поверхности Земли с гиродемпферами и системой терморегулирования на элементах Пельтье в узле взаимного демпфирования.

По результатам компьютерных экспериментов выявлено, что при определенных сочетаниях параметров рассматриваемой нелинейной динамической системы и внешних детерминированных температурных и механических возмущений возможно возникновение явления детерминированного хаоса. При этом необходимым условием его возникновения является наличие хотя бы одного неустойчивого состояния равновесия динамической системы. Построены области детерминированного хаоса, как функции параметров рассмотренного космического летательного аппарата дистанционного зондирования поверхности Земли в условиях внешних температурных и механических возмущений гармонического характера за счет движения космических летательных аппаратов по круговой орбите вокруг Земли. Получены фазовые портреты при переходе движений космических летательных аппаратов по тангажу от регулярных колебаний к хаотическим. Также получены качественные и количественные параметры хаотического режима колебаний КЛА.

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-08-00839.

5. Литература

- [1] Джашитов, В.Э. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов – С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ “Электроприбор”, 2005. – 404 с.
- [2] Lefevre, H. The Fiber-Optic Gyroscope – Norwood, MA: Artech House, 1993. – 24 p.
- [3] Zhihong, i. A novel method for determining and improving the quality of a quadrupolar fiber gyro coil under temperature variations / L. Zhihong, M. Zhuo, L. Tiegen, X. Steve Yao // Optics Express. – 2013. – Vol. 21(2). – P. 2521-2530.
- [4] Schadt, F. Error Signal Formation in FOGs Through Thermal and Elasto-optical Environment Influence on the Sensing Coil / F. Schadt, F. Mohr // Inertial Sensors and Systems – Symposium Gyro Technology – Karlsruhe, Germany, 2011.
- [5] Shupe, D.M. Thermally induced non-reciprocity in the fiber-optic interferometer // Appl. Opt. – 1980. – Vol. 19(5). – P. 654-655. DOI: 10.1364/AO.19.000654.
- [6] Барулина, М.А. Алгоритмы математического моделирования трехмерных нестационарных температурных полей прецизионных приборов авиакосмического назначения / М.А. Барулина, А.В. Голиков, В.М. Панкратов, М.В. Ефремов // Научное приборостроение. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 14-23.
- [7] Пельпор, Д.С. Гироскопические системы ориентации и стабилизации – М.: Машиностроение, 1982. – 165 с.
- [8] Вахрамеев, Е.И. Прогноз и коррекция теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа / Е.И. Вахрамеев, К.С. Галягин, А.С. Ивонин, М.А. Ошивалов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 5. – С. 79-84.
- [9] Басараб, М.А. Численно-аналитические тепловые и термоупругие модели волнового твердотельного гироскопа / М.А. Басараб, В.А. Матвеев, А.В. Юрин, Б.С. Лунин // XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, сборник материалов – С.-Петербург, 2016. – С. 42-45.
- [10] Barulina, M.A. Research of temperature and technological drift of a micromechanical gyroscope a type tuning fork-nogo on the vibrating basis / M.A. Barulina, V.E. Jashitov // Giroskopiya i navigaciya – 2005. – Vol. 48(1). – P. 93.
- [11] Barulina, M.A. The temperature effect on fiber optic gyroscopes based on air-core photonic crystal fiber / M.A. Barulina, V.M. Pankratov, M.V. Efremov // Proceedings of 23rd Saint

- Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS. – Saint Petersburg, 2016. – P. 93-97.
- [12] Jashitov, V.E. Harmonic solid-state inertial information sensor in temperature disturbances conditions / V.E. Jashitov, V.M. Pankratov, M.A. Barulina, A.V. Golikov // Sensors and systems. – 2010. – Vol. 5. – P. 57-61.
- [13] Джашитов, В.Э. Иерархические тепловые модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими гироскопами и акселерометрами / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов, А.В. Голиков // Гироскопия и навигация. – 2013. – Т. 80, № 1. – С. 49-63.
- [14] Dzhashitov, V.E. Computer course in the applied theory of gyros / V.E. Dzhashitov, V.M. Pankratov, A.V. Golikov // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2008. – Vol. 23(10). – P. 18-21.
- [15] Dzhashitov, V.E. On the Possibility of Control of Interconnected Mechanical and Thermal Processes in Nonlinear Temperature-Perturbed Dynamic Systems / V.E. Dzhashitov, V.M. Pankratov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2009. – Vol. 48(3). – P. 481-488.
- [16] Golikov, A.V. Modelling of Thermal Effects on Aerospace Devices and Their Components / A.V. Golikov, M.A. Barulina, E.V. Pankratova, O.V. Golikova. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 630(1). DOI 10.1088/1757-899X/630/1/012030.
- [17] Golikov, A.V. Analysis of Temperature Fields in Angular Velocity Measurement Units on Fiber-Optic Gyros / A.V. Golikov, V.M. Pankratov, M.V. Efremov // Gyroscopy and Navigation. – 2018. – Vol. 9(2). – P. 116-123.
- [18] Басараб, М.А. Математическое моделирование физических процессов в гироскопии / М.А. Басараб, В.Ф. Кравченко, В.А. Матвеев – М.: Радиотехника, 2005. – 176 с.
- [19] Шустер, Г. Детерминированный хаос. Введение – М.: Мир, 1988. – 240 с.
- [20] Боевкин, Б.И. Ориентация искусственных спутников в гравитационных и магнитных полях / Б.И. Боевкин, Ю.Г. Гуревич, В.П. Павлов, Г.Н. Толстосумов – М.: Наука, 1976. – 301 с.
- [21] Сарычев, В.А. Гироскоп на спутнике с двойным вращением // Космические исследования АН СССР. – 1982. – Т. XX, № 1. – С. 30-41.
- [22] Джашитов, В.Э. О возможности возникновения детерминированного хаоса и температурно-возмущенных волоконно-оптических гироскопах / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов // Гироскопия и навигация. – 1997. – Т. 17, № 2. – С. 7-16.

Analysis of the possibility of deterministic chaos during the movement of an Earth remote sensing satellite with mounted gyro dampers

V.M. Pankratov¹, E.A. Barulina¹, A.V. Golikov¹, E.V. Pankratova¹

¹Institute of Precision Mechanics and Control RAS, Rabochaya Street 24, Saratov, Russia, 410028

Abstract: The main goal of the work is mathematical modeling and analysis of pitch oscillations of an Earth remote sensing satellite, in the point of view of the possibility of occurrence of chaotic motion during the process of calming the natural oscillations relative to the satellite's mass center. A nonlinear mathematical model of oscillations of an Earth remote sensing satellite with floated gyrodampers. The floated gyrodampers have an integrated thermal control system based on Peltier elements is constructed. According to the results of computer experiments by dint of the developed library of temperature perturbation models, it is shown that for some critical values of the parameters of the system under consideration, deterministic chaos can occur. Phase portraits were obtained during the transition of the satellite in pitch oscillation from regular to chaotic motion. Areas of deterministic chaos are constructed as functions of the parameters of systems with gyro dampers and the characteristics of external temperature and mechanical disturbances.