

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

Кавинов Алексей Владимирович

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ ДВИЖЕНИЙ
АФФИННЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва – 2006

[illegible]

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Среди широкого класса детерминированных динамических систем с управлением можно выделить подкласс аффинных систем. В течение последних десятилетий была разработана техника преобразования аффинных систем к каноническому виду (А. Isidori; Н. Nijmeijer; А.П. Крищенко; В.И. Елкин; В. Jakubczyk, W. Respondek и др.), которая успешно применяется при решении различных задач теории управления. Заложенный в этой технике дифференциально-геометрический подход может быть применён к двум задачам теории управления – задаче управления хаосом и задаче управления угловым положением космического аппарата.

Начиная с 60-х годов предыдущего столетия важное место в исследованиях динамических систем занимает изучение систем с хаотической динамикой. Одной из задач теории управления в области хаотических систем является задача управления хаосом. Она заключается в устранении хаотической динамики системы при помощи малых управляющих воздействий. К настоящему времени известно несколько методов решения этой задачи (Е. Ott, С. Grebogi, J.A. Yorke; К. Pyragas и др.). Эти методы успешно применяются для решения технических задач. Однако, следует отметить неполную теоретическую обоснованность методов и отсутствие достаточных условий работоспособности методов для конкретной системы. В связи с этим актуальной представляется разработка теоретически обоснованного алгоритма управления хаосом при помощи малых управлений, применимого к достаточно широкому классу систем.

Задача управления угловым положением космического аппарата в различных постановках (В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский; П.Д. Крутько; С.А. Агафонов, К.Б. Алексеев, Н.В. Николаев; Р. Tsiotras и др.) также продолжает оставаться актуальной на протяжении последних десятилетий. Алгоритмы, основанные на представлении о твёрдом аппарате как о твёрдом теле, продолжают представлять интерес. Они могут применяться для небольших космических конструкций либо при небольших угловых скоростях движения объекта.

Целью работы является разработка методов управления детерминированным хаосом и угловым положением космического аппарата, основанных на дифференциально-геометрическом подходе и концепции стабилизации программного движения.

Методы исследования. В работе применяются методы теории дифференциальных уравнений, теории устойчивости, математической теории управления, дифференциальной геометрии и различные численные методы.

Научная новизна. Обоснован метод нелинейной стабилизации программного движения, основанный на дифференциально-геометрическом подходе. Разработаны два новых алгоритма управления хаосом, основанные на дифференциально-геометрических методах в теории управления. Первый алгоритм применим к системам с управлением, эквивалентным на всём пространстве состояний системам регулярного канонического вида. Доказана работоспособность алгоритма и возможность решения задачи при помощи малых управлений. Второй алгоритм может быть использован для более широкого класса систем, эквивалентных системам регулярного канонического вида на подмножестве пространства состояний, в том случае, если выполнены некоторые дополнительные условия. Показана возможность уменьшения управляющих воздействий путём численного решения задачи минимизации, а также проведён сравнительный анализ разработанных алгоритмов управления хаосом и известных методов.

С использованием дифференциально-геометрической техники решена задача стабилизации углового положения космического аппарата, предложен алгоритм построения ограниченного стабилизирующего управления и указана оценка области стабилизируемости. Метод стабилизации программной траектории применён для решения задачи переориентации космического аппарата.

Полученные результаты являются новыми.

Достоверность результатов обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата и подтверждается результатами численного моделирования.

Практическая и теоретическая ценность. Результаты, полученные в диссертационной работе, являются развитием математической теории управления и позволяют решать задачи управления детерминированным хаосом и управления угловым положением космического аппарата с использованием метода нелинейной стабилизации.

На защиту выносятся следующие основные результаты.

1. Обоснование метода нелинейной стабилизации, основанного на дифференциально-геометрическом подходе.
2. Методы управления детерминированным хаосом в системах, эквивалентных системам регулярного канонического вида на всём пространстве состояний или на подмножестве пространства состояний.
3. Решение задач стабилизации углового положения и переориентации космического аппарата при помощи метода нелинейной стабилизации.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались на VI международном семинаре «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления», проходившем в 2000 г. в Москве, на VIII всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике, проходившем в 2001 г. в Перми, на 13 международной конференции по процессам управления, проходившей в 2001 г. в Братиславе и на IX Международном семинаре "Устойчивость и колебания нелинейных систем управления" имени Е. С. Пятницкого, проходившем в 2006 г. в Москве.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в трёх научных статьях, четырёх тезисах докладов на конференциях и в отчёте о НИР.

Личный вклад соискателя. Все исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю, заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав и списка литературы. Работа изложена на 127 страницах, содержит 47 иллюстраций. Библиография включает 86 наименований.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №99-01-00863, №02-01-00704, №05-01-00840, грантов государственной поддержки ведущих научных школ №00-15-96137, НШ-2094.2003.1, проекта УР.03.01.018 по программе «Университеты России – фундаментальные исследования» Министерства образования РФ и проекта УР.03.01.141 раздела 1.2. «Университеты России» подпрограммы «Фундаментальные исследования» ведомственной научной программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Федерального агентства по образованию РФ и программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006 – 2007)», проект РНП 2.1.1.2381.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

Первая глава содержит описание и обоснование метода нелинейной стабилизации программных движений аффинных систем. Рассмотрены случаи систем со скалярным и векторным управлением.

В разделе 1.1 описывается процедура преобразования аффинных систем со скалярным управлением к эквивалентным системам канонического вида, алгоритмы нелинейной стабилизации программных движений и построения гарантированной оценки области стабилизируемости.

Известен дифференциально-геометрический подход к исследованию аффинных стационарных систем с управлением

$$\dot{x} = A(x) + B(x)u, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad u \in \mathbb{R}^1, \quad (1)$$

где $A(x) = (a_1(x), \dots, a_n(x))^T$, $B(x) = (b_1(x), \dots, b_n(x))^T$, $a_i(\cdot), b_i(\cdot) \in C^\infty(O)$, O — открытое подмножество в $\mathbb{R}^n = \{x \mid x = (x_1, \dots, x_n)^T\}$, а u — управление. Известна, в частности, техника преобразования аффинных систем (1) к эквивалентному каноническому виду

$$y^{(n)} = f(\bar{y}) + g(\bar{y})u, \quad \bar{y} = (y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)})^T = \Phi(x), \quad (2)$$

где $\Phi(x)$ — диффеоморфизм, а также необходимые и достаточные условия существования для систем (1) эквивалентных систем вида (2).

Говорят, что система канонического вида (2) регулярна на множестве $M \subset \Phi(\Omega)$, если $g(M) \neq 0 \forall M \in \Phi(\Omega)$.

Говорят, что пара из программного управления и программной траектории $(u_\Pi(t), x_\Pi(t))$, $t \in T$, $T = [t_*, +\infty)$ составляет программное движение системы (1), если

$$\forall t \in T \quad \dot{x}_\Pi(t) = A(x_\Pi(t)) + B(x_\Pi(t))u_\Pi(t), \quad |u_\Pi(t)| \leq u_*.$$

Задача стабилизации программного движения состоит в нахождении непрерывной обратной связи $u = u(x, t)$, $t \in T$, такой, что $|u(x, t)| \leq u_*$, $u(x_\Pi(t), t) = u_\Pi(t)$, а программная траектория $x_\Pi(t)$ будет асимптотически устойчивым решением замкнутой системы

$$\dot{x} = A(x) + B(x)u(x, t).$$

Программное движение аффинной системы $(u_\Pi(t), x_\Pi(t))$, $t \in T$, определяет программное движение $(u_\Pi(t), \bar{y}_\Pi(t))$, $t \in T$, эквивалентной системы канонического вида (2),

$$\bar{y}_\Pi(t) = (y_\Pi(t), \dot{y}_\Pi(t), \dots, y_\Pi^{(n-1)}(t))^T = \Phi(x_\Pi(t)),$$

для которого выполнено тождество

$$y_\Pi^{(n)}(t) = f(\bar{y}_\Pi(t)) + g(\bar{y}_\Pi(t))u_\Pi(t), \quad t \in T. \quad (3)$$

Стабилизация программного движения системы (2) достигается стабилизацией нулевого решения системы в отклонениях

$$\Delta y^{(n)} = F(\Delta \bar{y}, t) + G(\Delta \bar{y}, t)\Delta u, \quad (4)$$

где $\Delta y = y - y_{\Pi}(t)$, $\Delta u = u - u_{\Pi}(t)$, $\Delta \bar{y} = (\Delta y, \Delta \dot{y}, \dots, \Delta y^{(n-1)})^T$,

$$F(\Delta \bar{y}, t) = f(\bar{y}_{\Pi}(t) + \Delta \bar{y}) + g(\bar{y}_{\Pi}(t) + \Delta \bar{y})u_{\Pi}(t) - f(\bar{y}_{\Pi}(t)) - g(\bar{y}_{\Pi}(t))u_{\Pi}(t),$$

$$G(\Delta \bar{y}, t) = g(\bar{y}_{\Pi}(t) + \Delta \bar{y}).$$

Если эквивалентная система канонического вида регулярна на множестве $\Phi(\Omega)$, то для системы в отклонениях (4) определено управление

$$\Delta u(\Delta \bar{y}, t) = \frac{-F(\Delta \bar{y}, t) - K \Delta \bar{y}}{G(\Delta \bar{y}, t)}, \quad K = (k_0, \dots, k_{n-1}), \quad k_i = \text{const.} \quad (5)$$

Замкнутую этим управлением систему (4) можно записать как дифференциальное уравнение

$$\Delta y^{(n)} + K \Delta \bar{y} = 0.$$

Его нулевое решение асимптотически устойчиво при соответствующем выборе коэффициентов k_i . Тогда управление

$$u(\bar{y}, t) = u_{\Pi}(t) + \Delta u(\bar{y} - \bar{y}_{\Pi}(t), t) \quad (6)$$

стабилизирует программное движение системы (2).

Асимптотическая устойчивость решения системы в одних переменных в общем случае не гарантирует устойчивость соответствующего решения системы в других переменных. Для обоснования метода нелинейной стабилизации необходимо доказать, что при выполнении некоторых условий программное движение системы в исходных переменных также будет асимптотически устойчивым.

Известна¹ теорема, касающаяся устойчивости решений замкнутых систем в разных переменных. Эта теорема дает достаточное условие устойчивости нулевого решения системы в отклонениях. Однако, для использования с методом нелинейной стабилизации более удобными являются результаты, сформулированные для решений эквивалентных систем (1) и (2). В рамках диссертационной работы были сформулированы и доказаны теоремы об устойчивости программного движения в исходных переменных.

¹ Журавлёв В.Ф. Основы теоретической механики. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2001. – 320 с.

Теорема 1. Пусть $x_{\Pi}(t)$ и $y_{\Pi}(t) = \Phi(x_{\Pi}(t))$ — решения систем

$$\dot{x} = f(x, t), \quad x \in \Omega \subseteq \mathbb{R}^n$$

и

$$\dot{y} = h(y, t), \quad y \in \Phi(\Omega) \subseteq \mathbb{R}^n$$

соответственно, причём $\Phi(x)$ — диффеоморфизм, а обратное к нему отображение $\Phi^{-1}(x)$ глобально липшицево на $\Phi(\Omega)$. Пусть также решение $y_{\Pi}(t)$ (асимптотически) устойчиво, причём

$$\forall t_0 \in T \exists \sigma > 0 \forall t \geq t_0 \forall y \in \mathbb{R}^n : \|y - y_{\Pi}(t)\| < \sigma \Rightarrow y \in \Phi(\Omega). \quad (7)$$

Тогда решение $x_{\Pi}(t)$ (асимптотически) устойчиво.

Следствие 1. Пусть $x_{\Pi}(t)$ и $y_{\Pi}(t) = \Phi(x_{\Pi}(t))$ — решения систем

$$\dot{x} = f(x, t), \quad x \in \mathbb{R}^n$$

и

$$\dot{y} = h(y, t), \quad y \in \mathbb{R}^n$$

соответственно, причём $\Phi(x)$ — диффеоморфизм, а обратное к нему отображение $\Phi^{-1}(x)$ глобально липшицево на $\mathbb{R}^n$. Пусть также решение $y_{\Pi}(t)$ асимптотически устойчиво в целом. Тогда решение $x_{\Pi}(t)$ асимптотически устойчиво в целом.

Теорема 2. Пусть $x_{\Pi}(t)$ и $y_{\Pi}(t) = \Phi(x_{\Pi}(t))$ — решения систем

$$\dot{x} = f(x, t), \quad x \in \Omega \subseteq \mathbb{R}^n$$

и

$$\dot{y} = h(y, t), \quad y \in \Phi(\Omega) \subseteq \mathbb{R}^n, \quad y = \Phi(x),$$

соответственно, причём $\Phi(x)$ — диффеоморфизм, решение $y_{\Pi}(t)$ ограничено и (асимптотически) устойчиво, а замкнутая окрестность радиуса $\varepsilon(t_0)$ любой точки $y_{\Pi}(t)$, $t \geq t_0$, при любом $t_0 \in T$ является подмножеством $\Phi(\Omega)$. Тогда решение $x_{\Pi}(t)$ (асимптотически) устойчиво.

Далее в разделе 1.1 описывается алгоритм построения гарантированной оценки области стабилизируемости программного движения ограниченным управлением и приводится пример построения такой оценки.

В разделе 1.2 аналогичным образом рассматриваются аффинные системы с векторным управлением.

Вторая глава посвящена решению задачи управления хаосом в аффинных стационарных системах путем преобразования этих систем к каноническому виду и стабилизации некоторого их программного движения.

В разделе 2.1 приводятся необходимые сведения из теории хаотических систем, а также формулируется постановка задачи управления хаосом.

Пусть система

$$\dot{x} = A(x), \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad (8)$$

обладает хаотической динамикой. Задача управления хаосом заключается в построении для системы

$$\dot{x} = A(x) + B(x)u, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad u \in \mathbb{R}^m \quad (9)$$

такого управления в виде обратной связи, что замкнутая этим управлением система не будет обладать хаотической динамикой. Интерес при этом представляют лишь такие управления, величина которых может быть сделана меньшей любого наперед заданного положительного числа.

В разделе 2.2 производится анализ основных известных методов управления хаосом.

В разделе 2.3 описывается первый этап действия разработанного метода управления хаосом, заключающийся в поиске приближения к периодическому решению хаотической системы. Алгоритм поиска основан на методе локализации периодических решений (А.П. Крищенко) и свойстве рекуррентности хаотических решений. В процессе поиска рассматривается численное решение задачи Коши для системы (8) с некоторым начальным условием $x(0) = x_0$. Среди точек пересечения этого решения с универсальным сечением Пуанкаре

$$S_h = \{x \in \mathbb{R}^n \mid L_f h(x) = 0\},$$

где $h(x)$ — произвольная гладкая функция, всегда можно выбрать две точки $x(t_1)$ и $x(t_2)$, отстоящие друг от друга на расстояние, меньшее заранее заданного положительного числа ε . Заключенный

между этими точками отрезок траектории будем называть приближением к периодическому решению системы.

В разделе 2.4 описывается первый из разработанных методов управления хаосом. Метод применим к аффинным системам, эквивалентным некоторой регулярной системе канонического вида.

На основе полученного в результате поиска приближения строится кусочно-непрерывное периодическое программное движение системы. При этом

$$x_{\Pi}(t) = \begin{cases} x(t), & t \in [t_1, t_2); \\ x(t - k(t_2 - t_1)), & t \in [t_1 + k(t_2 - t_1), t_2 + k(t_2 - t_1)), \end{cases}$$

$u_{\Pi}(t) \equiv 0$, $k \in \mathbb{N}$. Стабилизацией этого программного движения достигается решение задачи управления хаосом при помощи малых управлений.

Теорема 3. Пусть система (9) эквивалентна на множестве $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ регулярной на $\Phi(\Omega) = \mathbb{R}^n$ системе (2). Пусть также отображение $\Phi^{-1}(\bar{y})$ глобально липшицево на $\mathbb{R}^n$. Тогда задача управления хаосом для системы (9) может быть решена при помощи управления

$$\begin{aligned} u_*(x, t) &= \Delta u(\bar{y} - \bar{y}_{\Pi}(t), t) = \\ &= \Delta u(\Phi(x) - \Phi(x_{\Pi}(t)), t). \end{aligned} \quad (10)$$

При этом управление (10) является малым в том смысле, что

$$\forall t \geq t_0 \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} u_*(x(t), t) = 0,$$

где ε — расстояние между началом и концом приближения к периодическому решению, а замкнутая управлением (10) система (9) имеет глобально асимптотически устойчивое периодическое решение x_f , причём

$$\forall t \geq t_0 \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (x(t) - x_f(t)) = 0.$$

В разделе 2.5 приведены результаты численного моделирования управления хаосом в системе Рёссlera с управлением

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_2 - x_3 \\ \dot{x}_2 = x_1 + ax_2 \\ \dot{x}_3 = x_1x_3 - bx_3 + c + u. \end{cases} \quad (11)$$

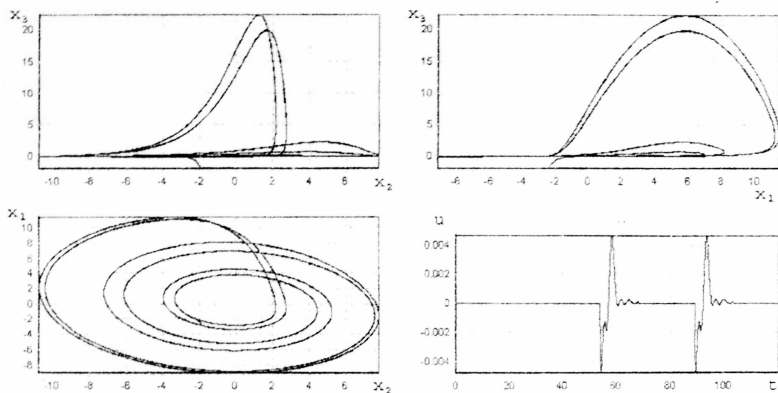


Рис. 1. Моделирование управления хаосом для системы Рёсслера

Система (11) эквивалентна системе канонического вида

$$\frac{d^3 y}{dt^3} = ay - \dot{y} + (\ddot{y} - ay + y)(\dot{y} - ay - b) - c - u. \quad (12)$$

В качестве универсального сечения Пуанкаре была выбрана поверхность

$$S_{x_2} = \{x \mid x_1 + ax_2 = 0\},$$

в качестве начальной точки — $x(0) = (-2.4036; -1.8825; -1.9071)^T$, $\varepsilon = 0.03$. Было найдено приближение к периодическому решению $t_1 = 18.69$, $t_2 = 53.74$, $x(t_1) = (0.79141; -3.97679; 0.03245)^T$, $x(t_2) = (0.79086; -3.97399; 0.03245)^T$. Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

В разделе 2.6 при помощи численного моделирования показана возможность применения модифицированного метода к нерегулярным системам, в частности, к системе Лоренца с управлением

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -ax_1 + ax_2 \\ \dot{x}_2 = cx_1 - x_2 - x_1x_3 \\ \dot{x}_3 = x_1x_2 - bx_3 + u. \end{cases} \quad (13)$$

Приведены результаты моделирования, из которых следует, что в нерегулярном случае теряется возможность управления хаосом при помощи малых управлений.

В разделе 2.7 описан второй из разработанных методов управления хаосом. Метод применим к аффинным системам, эквивалентным системам канонического вида на подмножестве пространства состояний. В диссертационной работе приведены результаты численного моделирования процесса управления хаосом для системы (13). Анализ этих результатов показывает, что для этой системы второй метод, в отличие от первого, позволяет решить задачу управления хаосом при помощи малых управлений.

В третьей главе рассматривается задача управления угловым движением космического аппарата (КА).

Раздел 3.1 содержит краткий обзор постановок задач управления угловым положением КА.

В разделе 3.2 произведён дифференциально-геометрический анализ уравнений движения КА.

Движение КА вокруг центра масс в орбитальной системе координат описывается системой уравнений в кватернионах

$$\begin{cases} J\dot{\omega} + \omega \times J\omega = u \\ 2\dot{\Lambda} = \Lambda \circ \omega. \end{cases} \quad (14)$$

Эта система не эквивалентна никакой системе канонического вида ни на каком подмножестве пространства состояний. Однако, перейдя к системе

$$\begin{aligned} \ddot{\Lambda} = \dot{\Lambda} \circ \text{vect} \left(\Lambda^{-1} \circ \dot{\Lambda} \right) - \\ - 2\Lambda \circ J^{-1} \left(\text{vect} \left(\Lambda^{-1} \circ \dot{\Lambda} \right) \times J \text{vect} \left(\Lambda^{-1} \circ \dot{\Lambda} \right) \right) + \frac{1}{2}\Lambda \circ J^{-1}u. \end{aligned} \quad (15)$$

на $\mathbb{R}^8$, а затем рассмотрев ограничение этой системы на шестимерное многообразие

$$K = \{(\lambda, \dot{\lambda}) \in \mathbb{R}^8 : \lambda_0^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1, \lambda_0\dot{\lambda}_0 + \lambda_1\dot{\lambda}_1 + \lambda_2\dot{\lambda}_2 + \lambda_3\dot{\lambda}_3 = 0\},$$

можно получить систему

$$\ddot{\Lambda} = \dot{\Lambda} \circ \Lambda^{-1} \circ \dot{\Lambda} - 2\Lambda \circ J^{-1} \left(\left(\Lambda^{-1} \circ \dot{\Lambda} \right) \times J \left(\Lambda^{-1} \circ \dot{\Lambda} \right) \right) + \frac{1}{2}\Lambda \circ J^{-1}u. \quad (16)$$

Задача управления угловым положением рассматривается в каждой из координатных карт атласа многообразия K . При этом система (16) в координатах каждой из этих карт может быть записана в каноническом виде, причем этот вид является регулярным. Это позволяет применить метод нелинейной стабилизации для управления угловым движением.

В разделе 3.3 описаны возможности программного обеспечения, разработанного в рамках работы для трёхмерной визуализации процессов моделирования углового движения КА под воздействием управления и сравнения результатов управления для разных методов.

В разделе 3.4 на основе изложенных в разделе 3.2 результатов в соответствии с концепцией нелинейной стабилизации решена задача стабилизации углового положения КА. Приведены результаты численного моделирования процесса стабилизации. Исследована зависимость свойств переходного процесса и стабилизирующего управления в зависимости от параметров метода. Изложен алгоритм построения гарантированной оценки области стабилизируемости углового положения при помощи построенного управления.

Постановка задачи стабилизации углового положения КА формулируется следующим образом: требуется сделать заданное состояние покоя КА асимптотически устойчивым относительно орбитальной системы координат. Всегда можно выбрать систему координат таким образом, чтобы стабилизируемое состояние описывалось кватернионом $(1, 0, 0, 0)$.

В соответствии с процедурой метода нелинейной стабилизации в каждой координатной карте многообразия K можно выбрать управление таким образом, чтобы динамика системы в отклонениях имела линейную экспоненциально устойчивую динамику.

На рисунке 2 представлены результаты моделирования процесса стабилизации КА, матрица тензора инерции которого имеет вид

$$J = \begin{pmatrix} 1200 & 1000 & 700 \\ 1000 & 1500 & 900 \\ 700 & 900 & 2000 \end{pmatrix} [\text{кг} \cdot \text{м}^2].$$

Приведены результаты моделирования для начального состояния, описываемого нормированным кватернионом

$\Lambda_0 = (0.92246, 0.05338, -0.07986, -0.37395)$ и вектором угловой скорости $\omega_0 = (0.5, 2, -0.5)^T$ [1/с]. Управление было выбрано так, чтобы в координатной карте, соответствующей множеству

$$M_{0+} = (\mathbb{R}^4 \times \mathbb{R}^4) \cap \{(\Lambda, \dot{\Lambda}) : \lambda_0 > 0\},$$

уравнение углового движения в переменных $\lambda_j, \dot{\lambda}_j, j = 1, 2, 3$, имело вид

$$\ddot{\lambda}_j + k_{1j}\dot{\lambda}_j + k_{0j}\lambda_j = 0, \quad (17)$$

где $k_{1j} = 0.06, k_{0j} = 0.0005$.

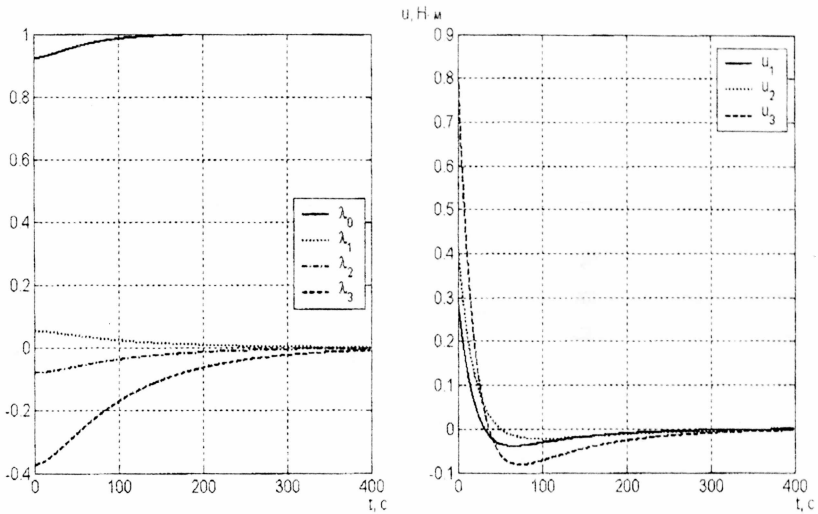


Рис. 2. Моделирование стабилизации углового положения КА

Был также получен алгоритм построения гарантированной области стабилизируемости системы при помощи ограниченного управления.

В разделе 3.5 изложено решение задачи переориентации КА со стабилизацией кинематической траектории движения.

Постановка задачи переориентации КА формулируется следующим образом: требуется перевести КА за заданное время t_* из заданного начального положения Λ_0 , ω_0 в заданное конечное положение покоя Λ_* , $\omega(t_*) = 0$. Известен алгоритм переориентации, основанный на построении кинематической траектории углового движения. Этот алгоритм позволяет построить программное движение, состоящее из кинематической траектории и управления, реализующего движение по этой траектории. При помощи метода стабилизации программной траектории в каждой из координатных карт многообразия K движение в соответствующих переменных может быть сделано экспоненциально устойчивым.

На рисунке 3 представлено программное движение, построенное для задачи переориентации с условиями $\Lambda_0 = (0.5, 0.5, -0.5, -0.5)$, $\omega_0 = (0, 0, 0)^T$, $\Lambda_* = (0.5, 0, 0.866, 0)$, $t_* = 200$ с. Матрица тензора инерции КА была выбрана такой же, как при моделировании стабилизации.

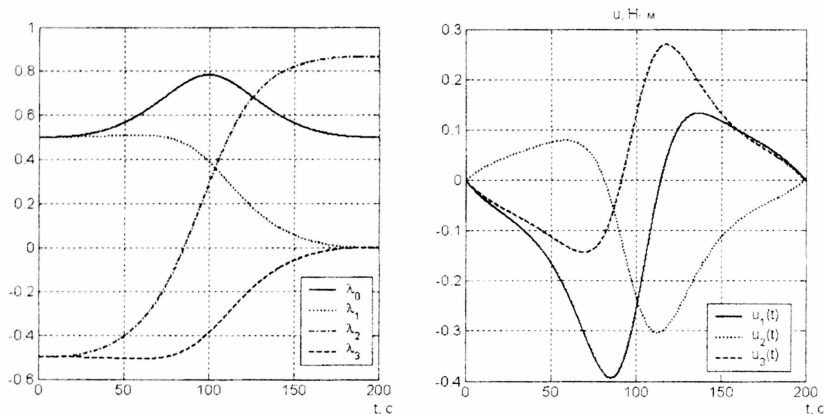


Рис. 3. Программное движение КА

На рисунке 4 представлены результаты моделирования процесса переориентации со стабилизацией построенного программного движения. В качестве начального состояния было выбрано $\Lambda_0 = (0.55, 0.4468, -0.4468, -0.5461)$, $\omega_0 = (0, 0, 0)^T$. Остальные условия задачи остались прежними.

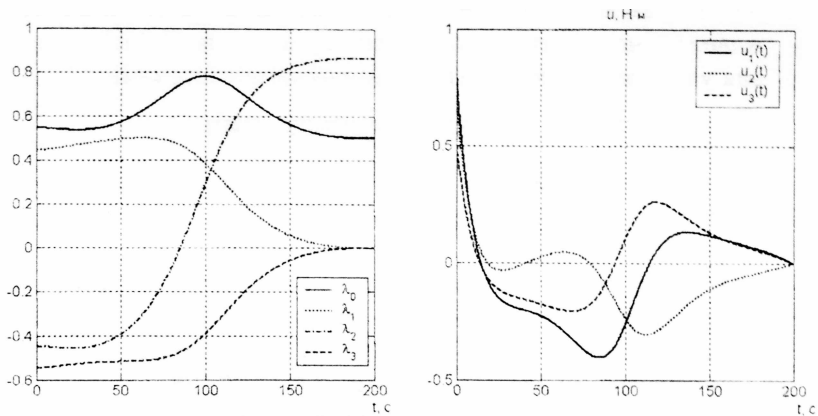


Рис. 4. Моделирование стабилизации программного движения КА

ОСНОВНЫЕ ВЫВОODY И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Сформулируем основные выводы и результаты проведенных исследований.

1. Получено обоснование решения задачи стабилизации программных движений стационарных аффинных систем с помощью преобразования их к эквивалентным регулярным каноническим видам.
2. Разработаны методы решения задачи управления хаосом при помощи малых управлений, основанные на дифференциально-геометрическом подходе в теории управления и решении задачи стабилизации.
3. При помощи метода нелинейной стабилизации решены задачи стабилизации углового положения КА и переориентации КА. Найдены оценки области стабилизируемости углового положения ограниченным управлением.

4. Анализ результатов математического моделирования подтверждает возможность использования предложенных алгоритмов для управления сложными динамическими системами.

ТРУДЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Крищенко А. П., Кавинов А. В. Стабилизация аффинных систем // Дифференциальные уравнения. – 2000. – Т. 36, № 11. – С.1482-1487.

2. Кавинов А. В., Крищенко А. П. Построение гарантированной оценки области стабилизируемости нелинейных систем // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: Тезисы докладов VI международного семинара. – Москва, 2000. – С. 75.

3. Разработка программного обеспечения для проектирования облика сборных космических станций и разработка алгоритма управления ориентацией: Отчет о НИР (заключ.) / МГТУ. НУК ФН; Руководитель А.П. Крищенко. - ФН 12/01; №ГР 01990008630; Инв. №02200103252. - М., 2000. - 123 с.

4. Attitude Control Design for Spacestation with Variable Structure / A.P. Krishchenko, S.B. Tkachev, A.V. Kavinov, M.A. Velishchanskii // 13 Int. Conf. on Process Control'01, June 11-14, Strbske Pleso. Summaries Volume, SUT. – Bratislava, 2001. – P. 36.

5. Управление угловым положением космического аппарата с изменяющейся структурой / М.А. Велищанский, А.В. Кавинов, А.П. Крищенко, С.Б. Ткачев // Восьмой всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: Тезисы докладов. – Пермь, 2001. – С. 150.

6. Крищенко А. П., Кавинов А. В. Подавление хаотической динамики // Дифференциальные уравнения. – 2004. – Т. 40, № 12. – С.1709-1715.

7. Кавинов А. В. Стабилизация программных движений и подавление хаотической динамики малыми управлениями // Нелинейная динамика и управление: Сборник статей / Под ред. С. В. Емельянова, С. К. Коровина (М.). – 2006. – Вып. 5. – С. 175-184.

8. Кавинов А. В. Управление хаосом в регулярных системах // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: Тезисы докладов IX международного семинара. – Москва, 2006. – С. 113-115.

Принято к исполнению 10/05/2006
Исполнено 11/05/2006

Заказ №378
Тираж: 100 экз.

ООО «11-й ФОРМАТ» ИНН 7726330900
Москва, Варшавское ш., 36
(495) 975-78-56
(495) 747-64-70
www.autoreferat.ru