

Для обеспечения необходимой точности и астатических свойств системы достаточно скорректировать настройку интегратора, а структуру нечеткого регулятора оставить без изменений, ограничив базу правил минимальным количеством термов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лубенцов В.Ф.* Исследование динамики систем с непрерывными аппроксимирующими функциями управления // Наука и технологии: Труды XXV Российской школы по проблемам науки и технологий. Ч.2. – М.: РАН, 2005. – С. 469-476.
2. *Лубенцов В.Ф., Масютина Г.В.* Коррекция регуляторов нелинейных систем с использованием нечеткой логики / Системный синтез и прикладная синергетика // Международная научная конференция 29.09-02.10.2009 г. Пятигорск. Сб. докладов. – Пятигорск: РИА на КМВ, 2009. – С. 220-223.
3. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
4. *Zadeh L.* The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems // Fuzzy Sets a Systems. – 1983. – Vol. 11, № 3. – P. 553-557.
5. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 736 с.
6. *Кукса П.П.* Обеспечение точности в нечетких системах [Электронный ресурс]. URL: <http://paul.rutgers.edu/~phuksa/publications/fz-accuracy-1u-04.pdf>.
7. *Денисенко В.* ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 1. – С. 78-88.

Масютина Галина Владимировна

Невинномысский технологический институт ГОУ ВПО «Северо-Кавказский государственный технический университет».

E-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru.

357108, г. Невинномысск, ул. Гагарина, 1.

Тел.: 88655471343; 8865570401.

Лубенцов Валерий Федорович**Masyutina Galina Vladimirovna**

Nevinnomyssk institute of technology "North Caucasian state technical university".

E-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru.

1, Gagarina street, Nevinnomyssk, 357108, Russia.

Lubenzov Valery Fedorovich

УДК 681.51

А.А. Колесников

**СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ОРБИТАЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ**

Решена задача управления полетом космического летательного аппарата с малой тягой с использованием системного закона гравитационного взаимодействия. Приведены процедура синтеза и результаты моделирования.

Моделирование; космический аппарат; нелинейная динамика; нелинейные системы; нелинейное управление.

А.А. Kolesnikov

**SYNTHESIS AND MODELING OF SPACE VEHICLE'S
ORBITAL MOTIONS CONTROL SYSTEMS**

We solve an applied problem of "low-trust" space vehicles control by using system's law of gravity. Control laws synthesis procedure as well as simulation results are provided.

Modeling; space vehicle; nonlinear dynamics; nonlinear systems; nonlinear control.

Проблемы управления космическими летательными аппаратами (КЛА) в силу своей чрезвычайной прикладной значимости относятся к числу важнейших проблем современной науки и техники. К ним, в частности, относится проблема высокоточного и энергетически эффективного управления орбитальным движением КЛА с «малой тягой» [1-6].

В этой связи в докладе рассматривается синергетический подход к синтезу систем управления КЛА, опирающийся на известный *метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов* – АКАР [7], согласно которому в пространство состояний синтезируемых систем вводятся желаемые *инвариантные многообразия*. В нашем случае – это *энергетические интегралы движения*. Такой подход позволяет аналитически определить обратные связи, формирующие требуемый характер орбитального движения КЛА. Основные особенности метода АКАР применительно к проблеме системного синтеза состоят, во-первых, в кардинальном изменении *целей поведения* синтезируемых систем; во-вторых, в непосредственном учете *естественных свойств* нелинейных объектов; и, в-третьих, в формировании *нового механизма генерации обратных связей*, т.е. законов управления [7].

Синтез законов управления. Уравнения, описывающие орбитальное движение КЛА в космическом пространстве имеют следующий вид [1, 2]:

$$\dot{r}(t) = V_r, \quad \dot{V}_r(t) = V_\theta^2 r^{-1} - \frac{h^2}{p} r^{-2} + U_r, \quad (1)$$

$$\dot{\theta}(t) = V_\theta r^{-1}, \quad \dot{V}_\theta(t) = -V_r V_\theta r^{-1} + U_\theta, \quad (2)$$

где обозначено: r, θ – полярные координаты; V_r, V_θ – радиальная и трансверсальная составляющие скорости; U_r, U_θ – составляющие вектора тяги; $\theta = \chi + \gamma$, χ – истинная аномалия, γ – угловая постоянная, которая определяет угол между линией апсид и осью OX (рис. 1). Полярные r и θ и декартовы x и y координаты связаны между собой выражениями $x = r \cos \theta$ и $y = r \sin \theta$. Параметры орбиты связаны между собой следующими соотношениями:

$$h = \frac{2\pi\sqrt{1-e^2} p^2}{(1-e^2)^2 T}; \quad \frac{h^2}{p} = GM,$$

где p – фокальный радиус; G – постоянная гравитации; M – масса притягивающего центра; T – время обращения; e – эксцентриситет эллипса. Управления U_r и U_θ считаются малыми, если они удовлетворяют условию

$$(U_r^2 + U_\theta^2)^{1/2} \ll \frac{h^2}{pr_{\max}^2}.$$

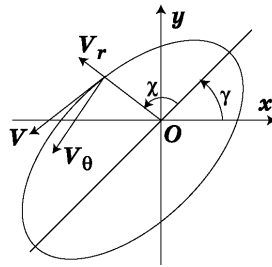


Рис. 1. Система координат искусственного спутника Земли

В методе АКАР ключевым этапом является выбор инвариантных притягивающих многообразий, адекватных физической сущности синтезируемых систем управления. Уравнения движения КЛА (1) и (2) при $U_r = U_\theta = 0$ описывают гравитационное взаимодействие двух тел в соответствии с законом тяготения Ньютона. В этом случае уравнения (1), (2) – это колебательная консервативная система. Известно, что для таких систем наиболее характерным свойством является сохранение энергии. Отсюда следует, что для синтеза законов управления консервативными системами наиболее целесообразно использовать энергетические интегралы движения.

Рассмотрим задачу синтеза законов управления U_r и U_θ , опираясь на метод АКАР [7]. Для этого выберем в качестве инвариантных многообразий следующие выражения:

$$\psi_1 = 0,5(V_r^2 + V_\theta^2) - \frac{h^2}{pr} + \frac{(1-e^2)h^2}{2p^2} = 0 \tag{3}$$

и

$$\psi_2 = r^2 \dot{\theta}(t) - h = rV_\theta - h = 0. \tag{4}$$

Инвариантное многообразие $\psi_1 = 0$ (3) – это энергетический интеграл стационарного движения КЛА, где $E = -\frac{(1-e^2)h^2}{2p^2} < 0$ – полная энергия; а многообразии

$\psi_2 = 0$ (4) – это закон сохранения момента системы «Земля – КЛА». Введем, согласно методу АКАР [7], следующие инвариантные соотношения:

$$\dot{\psi}_1(t) + \Phi \psi_1(t) = 0 \tag{5}$$

и

$$\dot{\psi}_2(t) + \Phi \psi_2(t) = 0, \tag{6}$$

которым должны удовлетворять многообразия (3) и (4). Тогда в результате совместного решения уравнений (5) и (6) в силу уравнений КЛА (1), (2) находим следующие законы управления:

$$U_r = -\left(\psi_1 - \frac{V_\theta \psi_2}{r}\right) \frac{\Phi}{V_r} \tag{7}$$

и

$$U_\theta = -\frac{\psi_2}{r} \Phi. \tag{8}$$

Для обеспечения асимптотической устойчивости уравнений (5) и (6) относительно инвариантных многообразий $\psi_1 = 0$ (3) и $\psi_2 = 0$ (4) функция Φ должна быть определенно-положительной и иметь размерность, обратную времени. В этой связи выберем эту функцию в виде

$$\Phi = k \frac{V_r^2}{h}, \quad (9)$$

где k – безразмерный коэффициент.

На пересечении инвариантных многообразий $\psi_1 = 0$ (3) и $\psi_2 = 0$ (4) законы (7), (8) «обнуляются» и, следовательно, КЛА будет устойчиво двигаться вдоль заданной орбиты – предельного цикла. При этом орбита КЛА будет описываться уравнением эллипса – первого закона Кеплера

$$\omega_1 = r(1 + e \cos \theta) - p = 0. \quad (10)$$

Если в $\psi_1 = 0$ (3) подставить соотношения $\psi_2 = 0$ (4) и $\omega_1 = 0$ (10), то в результате получим интеграл движения $\dot{\omega}_1(t) = 0$, т.е.

$$V_{rs} = \frac{eh}{p} \sin \theta. \quad (11)$$

Если подставить в (11) функцию $\sin \theta$ из (10), то получим радиальную скорость орбитального движения $V_{rs} = \frac{h}{pr} \sqrt{e^2 r^2 - (p - r)^2}$, которая, естественно, совпадает с V_{rs} на пересечении инвариантных многообразий $\psi_1 = 0$ (3) и $\psi_2 = 0$ (4).

Выражение (11) можно выдвинуть в качестве дополнительного динамического инварианта, на основе которого можно получить известный закон тяготения Ньютона. При этом квадрат $\dot{\omega}_1^2(t) = \psi_1$ при $\omega_1 = 0$ и $\psi_2 = 0$. Это означает, что $\dot{\omega}_1(t) = 0$ – это также энергетический инвариант, вытекающий из $\psi_1 = 0$ (3).

Интересно отметить важное свойство самоподобия в системе (1), замкнутой законами управления U_r (7) и U_θ (8). Эти законы переводят изображающую точку замкнутой системы (1), (7), (8) сначала на пересечение инвариантных многообразий $\psi_1 = 0$ (3) и $\psi_2 = 0$ (4). Это означает, что выполняется энергетический интеграл движения. Затем система неизбежно выходит на инвариант (11), где и будет находиться сколь угодно долго вплоть до появления новых внешних возмущений. После попадания системы на указанное пересечение управления U_r (7) и U_θ (8) «обнуляются» и в системе (1) снова выполняется энергетический интеграл движения $\psi_1 = 0$ (3). Иначе говоря, в результате своего рода «эстафеты аттракторов» $\psi_1 = \psi_2 = 0 \rightarrow \dot{\omega}_1(t) = 0$ (11) происходит динамическая декомпозиция системы [7]. Именно в этом и состоит, говоря языком синергетики, свойство самоподобия процессов в замкнутой системе.

На основе законов управления U_r (7) и U_θ (8) с учетом функции (9) путем задания желаемых параметров $e = e_0 < 1$ и $p = p_0$ может быть осуществлено полное или частичное изменение элементов орбиты движения КЛА. При этом будет обеспечено достижение желаемых величин энергии $E_0 = \frac{(e^2 - 1)h_0^2}{2p_0^2} < 0$ и параметра h_0 , определяющих орбиту движения КЛА. Полагая, в частности, $e_0 = 1$ и, следовательно, $E_0 = 0$, мы получим решение задачи разгона КЛА до параболической скорости, а при $e_0 > 1$ и $E_0 > 0$ будет реализовано движение КЛА по желаемой гиперболической траектории и т.д.

Итак, на основе естественных гравитационных закономерностей (1) и (2) синтезированы системные законы управления (7) и (8), гарантирующие асимптотически устойчивое орбитальное движение КЛА. Как показано выше, эти законы «обнуляются» на инвариантных многообразиях $\psi_1 = 0$ (3) и $\psi_2 = 0$ (4), в результате чего КЛА будет двигаться по заданной орбите, определяемой его энергией гравитационного взаимодействия с центральным телом, в частности, Землей.

Результаты моделирования. На рис. 2-5 приведены результаты моделирования процессом управления маневром КЛА, т.е. перевода его с круговой орбиты с параметрами: $e = 0$, $p = 36000$ км, $T = 24$ часа, $h = \frac{2\pi p^2}{T}$, $k = 1$ и начальными возмущениями: $r_0 = 40000$ км, $\dot{r}_0 = 0,5$, $\theta_0 = 0$ на более низкую эллиптическую орбиту Земли с параметрами: $e = 0,1$, $p = 24000$ км, $T = 24$ часа, $k = 1$. При этом в некоторый момент времени в законах управления U_r (7) и U_θ (8) были изменены параметры орбиты e и p . Как показывают эти результаты, КЛА успешно реализуют указанный маневр в космическом пространстве, переходя на новую орбиту движения. В целом, приведенные результаты моделирования полностью подтверждают выдвинутые в докладе базовые научные положения.

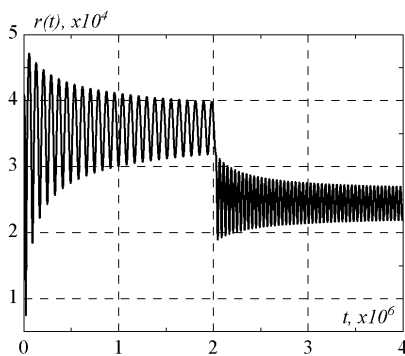


Рис. 2. График изменения $r(t)$

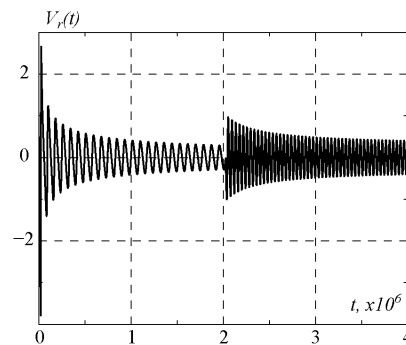


Рис. 3. График изменения $\dot{r}(t) = V_r(t)$

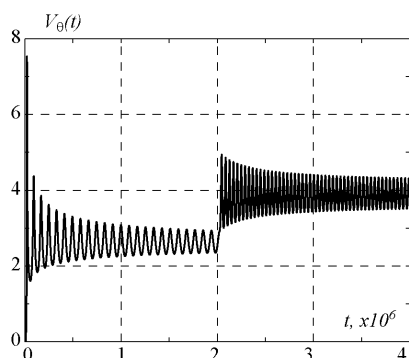


Рис. 4. График изменения $V_{\theta}(t)$

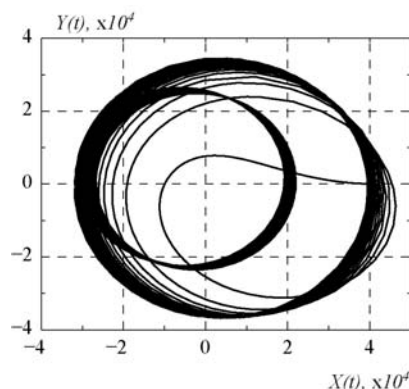


Рис. 5. Фазовый портрет

Подведем итоги. В докладе синтезированы новые законы управления (7), (8) орбитальным движением КЛА, отражающие естественный характер гравитационного взаимодействия двух тел – КЛА и соответствующей планеты, например, Земли. Указанные законы позволяют реализовать энергетически эффективное управление орбитальным движением КЛА путем задания желаемых параметров энергетических инвариантов соответствующей орбиты. Эти законы, в отличие от известных, не имеют сингулярностей и, кроме того, они построены в функции координат состояния КЛА. После вывода КЛА на новую орбиту законы управления (7) и (8) «обнуляются», а КЛА будет двигаться по этой орбите в соответствии с законом тяготения Ньютона. Синтезированные законы управления (7) и (8) позволяют также реализовать пространственное движение КЛА по параболической ($e = 1$) или гиперболической ($e > 1$) траекториям. В целом, в докладе, на наш взгляд, решена важная задача управления КЛА, позволяющая улучшить навигационные и энергетические характеристики разных аэрокосмических систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черноусько Ф.Л., Акуленко Л.Д., Соколов Б.Н.. Управление колебаниями. – М.: Наука, 1987. – 384 с.
2. Акуленко Л.Д. Асимптотические методы оптимального управления. – М.: Наука, 1987. – 368 с.
3. Салмин В.В. Оптимизация космических перелетов с малой тягой: Проблемы совместного управления траекторным и угловым движением. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
4. Гродзовский Г.Л., Иванов Ю.Н., Токарев В.В. Механика космического полета: Проблемы оптимизации. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
5. Ефимов Г.Б., Охоцимский Д.Е. Об оптимальном разгоне космического аппарата в центральном поле // Космические исследования. – 1965. – Т. 3, №6. – С. 15.
6. Лоуден Д. Оптимальные траектории для космической навигации. – М.: Мир, 1966. – 356 с.
7. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза. – М.: КомКнига, 2006. – 240 с.

Колесников Александр Анатольевич

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: office.ccsd@gmail.com.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634318090.

Kolesnikov Alexander Anatol'evich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: office.ccsd@gmail.com.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634318090.

УДК 681.511.4

А.А. Кузьменко

НЕЛИНЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ: СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

В статье на основе синергетического подхода к проблеме нелинейного системного синтеза изложен метод синтеза нелинейных законов управления для электроэнергетической системы (ЭЭС), обеспечивающих подавление внешнего кусочно-постоянного возмущения, действующего на ЭЭС со стороны энергосистемы.

Электроэнергетическая система; турбогенератор; синергетическая теория управления; инвариант; возмущение; астатический закон управления.

A.A. Kuzmenko

ELECTRICAL POWER SYSTEM NONLINEAR CONTROL: SYNERGETICS APPROACH

Basing on synergetics approach to problem of nonlinear system synthesis we expose method of electrical power system (EPS) nonlinear control laws synthesis, providing suppression of external piecewise-constant disturbance acts to EPS from the side of power system.

Electrical power system; turbogenerator; synergetics control theory; invariant; disturbance; zero-constant-error control law.

Современный мир технологий немислим без электроэнергетики. Значительное место по-прежнему занимают электростанции, работающие на твердом или жидком топливе. Наиболее распространенными генерирующими компонентами ЭЭС являются турбогенераторы. Современные электростанции оснащены группами турбогенераторов, работающих параллельно и взаимодействующих через общую электрическую сеть. Основные составляющие элементы турбогенератора – это турбина и синхронный генератор (СГ), находящиеся на одном валу. Такое широкое применение турбогенераторов в качестве источников электроэнергии обусловлено их высоким КПД. Современные ЭЭС представляют собой комплекс различных подсистем, связанных между собой процессами интенсивного динамического взаимодействия и обмена энергией, веществом и информацией. Указанные макросистемы являются нелинейными, многомерными и многосвязными, в которых протекают сложные переходные процессы и возникают критические и хаотические режимы. Проблемы управления такими динамическими макросистемами являются весьма актуальными, чрезвычайно сложными и практически недоступными для существующих в энергетике методов автоматического управления [1, 2]. Традиционные методики построения алгоритмов управления ЭЭС обычно строятся по принципу так называемой «компенсации» нелинейностей моделей или их игнорирования, сепарирования имеющихся каналов управления, нейтрализации перекрестных связей и т.п. Подобные вынужденные искусственные приемы, вы-