УДК 681.5: 681.5.01

УПРАВЛЕНИЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

***Б.К. Чостковский*[1], *В.Ю. Денисов*[2]**

[1] Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

[2] АО «РКЦ «Прогресс»
Россия, 443009, г. Самара, ул. Земеца, 18

Рассматривается использование структурных решений применительно к управлению одноосной и трехосной системой позиционирования космических аппаратов (КА). Исследуется проблема применения межконтурных регуляторов в многосвязной системе управления. Рассматриваются методы синтеза одноосной и трехосной систем ориентации. Решается задача улучшения динамических характеристик за счет введения корректирующего контура для одноосной системы координат; для многосвязной системы управления позиционированием по трем координатам вводятся межконтурные регуляторы в гироскопические каналы многосвязной системы.

Ключевые слова: *многосвязная система управления, оптимизация регуляторов, космический аппарат, позиционирование, система ориентации и стабилизации, двухконтурная система управления.*

Одним из важных направлений современного развития теории управления является построение многосвязных систем управления объектами с несколькими входными и выходными воздействиями [1-3].

В качестве такого объекта рассматривается космический аппарат, целью управления которого является его позиционирование по одной, двум и трем координатам с максимально возможной точностью [1]. Ранее при исследовании объектов управления с подобными математическими моделями показано, что эффективным способом достижения указанной цели является синтез контуров управления с межконтурными связями [2]. Актуальным является применение данного подхода к управлению космическим аппаратом и выбор наилучших структур соответствующей управляющей системы.

Управление позиционированием КА по одной координате с использованием терминального регулятора

В [1] предложено в системах позиционирования КА использовать терминальный регулятор, который позволяет управлять длительностью переходного процесса и его формой. Построенный по такому принципу регулятор в сочетании с возможностью тактирования его по пространственной координате позволяет обеспечить попадание объекта в заданную точку фазового пространства в регламентированный момент времени или прохождение объекта через заданные пространственные координаты.

Борис Константинович Чостковский (д.т.н.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Владимир Юрьевич Денисов, инженер.

Управление позиционированием КА по одной координате с использованием многоконтурной системы управления

Предположим, что нужно в некоторый момент времени провести точное позиционирование КА на заданной точке, для чего можно использовать активную систему ориентации и стабилизации КА (рис. 1).

Для улучшения динамических характеристик одноосной системы ориентации и стабилизации КА предлагается построить двухконтурную систему управления (рис. 2). Суть построения данной системы заключается в том, что в течение возмущенного переходного процесса в медленнодействующем (верхнем) контуре α в быстродействующем (нижнем) контуре возникает воздействие отклонения $\Delta\alpha$, которое компенсирует влияние α на α_1.

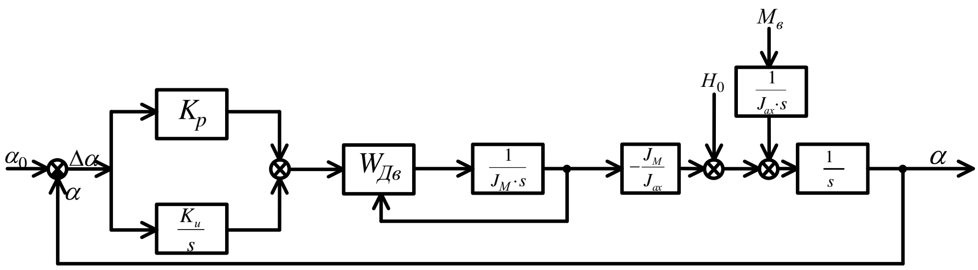

Рис. 1. Структурная схема одноосной системы ориентации КЛА

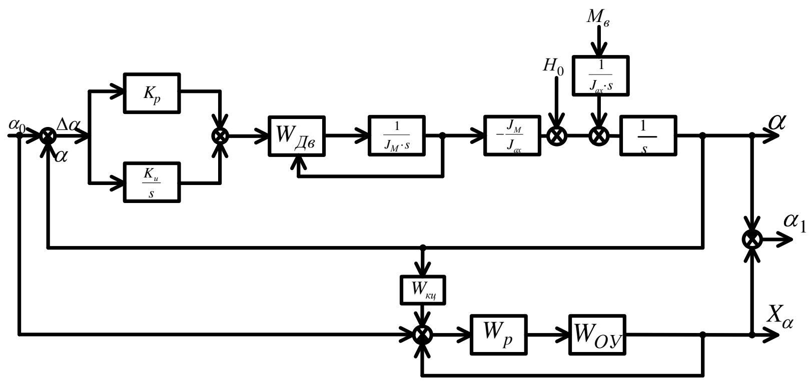

Рис. 2. Исследуемая структурная схема двухконтурной системы управления одноосной активной ориентацией и стабилизацией КА

Построим при помощи имитационной модели Simulink переходный процесс верхнего контура (рис. 3) [3].

В схеме, изображенной на рис. 1, рис. 2 и рис. 4, введены следующие обозначения: α_0 – задающее воздействие; α – выход медленнодействующего контура; X_α – выход быстродействующего контура; α_1, α_2 – выходы двухконтурной системы; $W_{кц}$ – передаточная функция корректирующей цепи; $W_{мкр}$ – передаточная функция межконтурного регулятора; $K_к$ – коэффициент коррекции; $M_в, H_0$ – возмущающие воздействия; K_p – коэффициент передачи пропорционального звена в ПИ-регуляторе; $K_и$ – коэффициент передачи интегрирующего звена в ПИ-регуляторе; $W_{Дв}$ – передаточная функция двигателя; W_p – передаточная функция регулятора быстродействующего контура; $W_{ОУ}$ – передаточная функция объекта управления быстродействующего контура; $J_м$ – момент инерции двигателя; J_{ax} – момент инерции космического аппарата относительно оси x .

Начальные условия примем $\alpha_0 = 0{,}5\, рад, M_в = 0, H_x(0) = 0$.

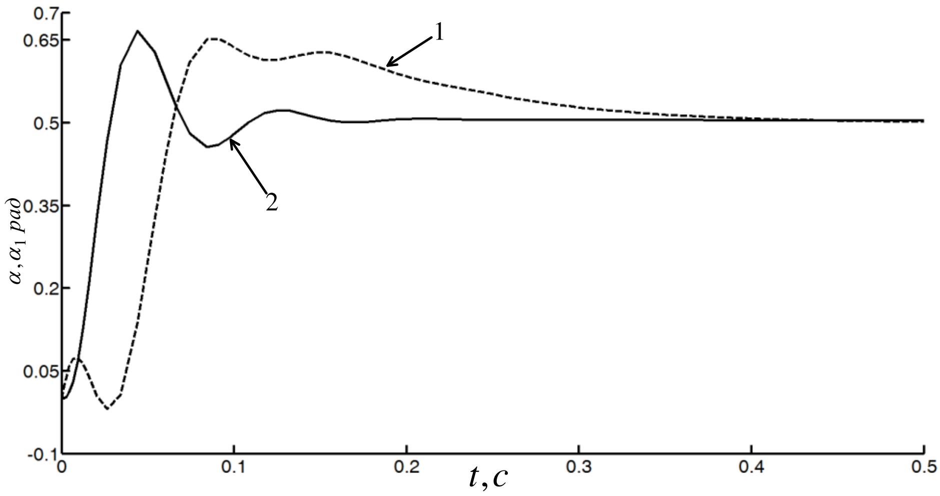

Рис. 3. Сравнение переходных процессов двухконтурной системы управления одноосной активной ориентацией и стабилизацией КА: 1 – по выходу α_1; 2 – по выходу α

Отсюда следует, что, как видно из рис. 3, использование структурного решения, основанного на принципе построения двухконтурной системы (условно назовем данную систему двухконтурной системой 1-го типа) (см. рис. 2), не привело к уменьшению времени перехода в установившейся режим (кривая 1). При использовании двухконтурной системы управления 1-го типа с корректирующей цепью (кривая 1) процесс ориентации на заданный угол составляет 0,3 с, но уменьшилось перерегулирование на 2–3 %.

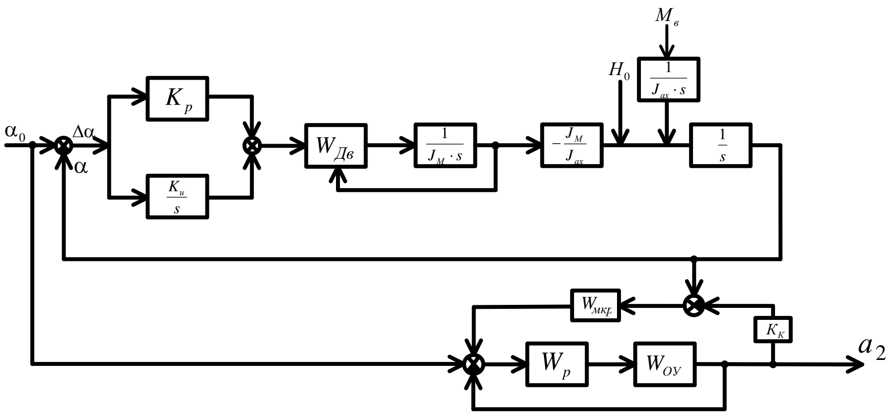

Рис. 4. Исследуемая структурная схема двухконтурной системы управления одноосной активной ориентацией и стабилизацией КА

Рассмотрим двухконтурную систему управления с введением в систему 3-го контура (межконтурной системы координации). Объектом управления третьего контура является уже описанный быстродействующий контур, а источником возмущающего воздействия – медленнодействующий контур. Требуемые динамические характеристики межконтурной связи достигаются оптимизацией параметров вводимого межконтурного регулятора. Структурная схема представлена на рис. 4. В качестве регулятора межконтурной системы координации предлагается выбрать ПИД-регулятор, с которым при появлении скачкообразного возмущающего воздействия в первом контуре обеспечивается компенсация влияния его динамической ошибки на α_2.

Используя имитационную модель Simulink, построим переходные процессы по выходу α, α_1, α_2 (рис. 5).

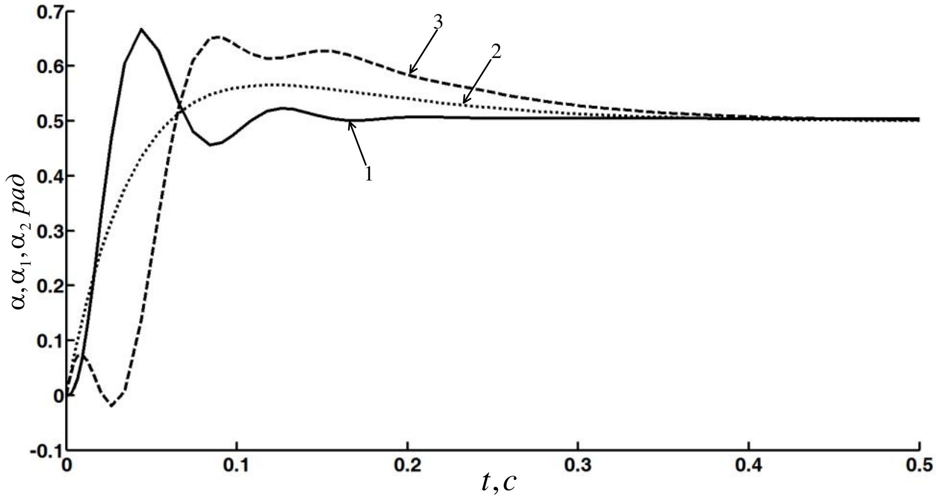

Рис. 5. Сравнение переходных процессов исследуемой двухконтурной системы: 1 – по выходу α; 2 – по выходу α_1 с применением двухконтурной системы 1-го типа с межконтурными связями; 3 – по выходу α_2 с применением двухконтурной системы 2-го типа с межконтурной системой координации

Таким образом, из семейства переходных характеристик, изображенных на рис. 5, следует, что применение двухконтурной системы управления 2-го типа с межконтурной системой координации привело к улучшению динамических характеристик по выходу одноосной системы ориентации и стабилизации КА. А именно: время переходного процесса осталось прежним и составляет теперь 0,3 с, но зато уменьшилось перерегулирование на 55 %. Из этого следует, что КА будет выходить на заданный угол ориентации за 0,3 с, но со значительно меньшим перерегулированием.

Таким образом, построение двухконтурной системы управления с введением корректирующей цепи и межконтурной системы координации является оправданным.

Управление позиционированием КА по трем координатам

Рассмотрим позиционирование КА по трем координатам. При ориентации КА относительно вращающейся базовой системы отсчета возникают перекрестные связи между каналами управления за счет гироскопических моментов. Эти моменты появляются в результате того, что угловые скорости $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ включают соответствующие проекции угловой скорости базовой системы отсчета. Это обусловливает необходимость одновременного рассмотрения процессов управления ориентацией по всем трем осям с учетом перекрестных связей. В дальнейшем предположим, что КА движется по околокруговой орбите [4, 5, 6, 7].

Как известно, движение твердого тела относительно неподвижной точки описывается уравнениями Эйлера, которые в нашем случае применительно к трем осям имеют вид [4, 8]

$$\begin{aligned}
&J_{ax} \cdot \frac{d\omega_{ax}}{dt} + (J_{az} - J_{ay}) \cdot \omega_{ay} \cdot \omega_{az} = \sum M_x; \\
&J_{ay} \cdot \frac{d\omega_{ay}}{dt} + (J_{az} - J_{ax}) \cdot \omega_{az} \cdot \omega_{ax} = \sum M_y; \\
&J_{az} \cdot \frac{d\omega_{az}}{dt} + (J_{ax} - J_{ay}) \cdot \omega_{ax} \cdot \omega_{ay} = \sum M_z;
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
&\sum M_x = M_{\partial x} + M_{вx} + M_{\text{ГР}x}; \\
&\sum M_y = M_{\partial y} + M_{вy} + M_{\text{ГР}y}; \\
&\sum M_z = M_{\partial z} + M_{вz} + M_{\text{ГР}z},
\end{aligned} \tag{2}$$

где $M_{\partial x}, M_{\partial y}, M_{\partial z}$ – составляющие внутреннего момента, создаваемого маховиками; $M_{вx}, M_{вy}, M_{вz}$ – составляющие суммарного вектора внешних моментов, исключая гравитационный; $M_{\text{ГР}x}, M_{ГРy}, M_{ГРz}$ – составляющие гравитационного момента.

Систему уравнений (1) нужно дополнить следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
&\omega_{ax} = \dot{\varepsilon}_1 + f(u) \cdot \dot{\varepsilon}_2; \\
&\omega_{ay} = \dot{\varepsilon}_2 - f(u) \cdot \dot{\varepsilon}_1; \\
&\omega_{az} = \dot{\varepsilon}_3 - \dot{f}(u),
\end{aligned} \tag{3}$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – видоизмененные углы Эйлера, которые рассматриваются как функции времени; $f(u)$ – функция аргумента широты [4]. Данные углы являются углами крена, рыскания и тангажа соответственно.

При использовании подвижной базовой системы координат движение КА будем рассматривать в инерциальной системе координат [4, 9].

В случае малых угловых отклонений КА от положения заданной ориентации и их производных после подстановки выражений (3) в (1), заменяя $f(u) = f$ для простоты записи, получим:

$$J_{ax}\cdot\frac{d}{dt}\left(\dot{\varepsilon}_1+\dot{f}\cdot\varepsilon_2\right)+(J_{az}-J_{ay})\cdot\left(\dot{\varepsilon}_2-\dot{f}\cdot\varepsilon_1\right)\cdot\left(\dot{\varepsilon}_3-\dot{f}\right)=M_{\partial x}+M_{\textit{в}x}+M_{\text{ГР}x};$$
$$J_{ay}\cdot\frac{d}{dt}\left(\dot{\varepsilon}_2-\dot{f}\cdot\varepsilon_1\right)+(J_{az}-J_{ax})\cdot\left(\dot{\varepsilon}_3-\dot{f}\right)\cdot\left(\dot{\varepsilon}_1+\dot{f}\cdot\varepsilon_2\right)=M_{\partial y}+M_{\textit{в}y}+M_{\text{ГР}y}; \quad (4)$$
$$J_{az}\cdot\frac{d}{dt}\left(\dot{\varepsilon}_3-\dot{f}\right)+(J_{ax}-J_{ay})\cdot\left(\dot{\varepsilon}_1+\dot{f}\cdot\varepsilon_2\right)\cdot\left(\dot{\varepsilon}_2-\dot{f}\cdot\varepsilon_1\right)=M_{\partial z}+M_{\textit{в}z}+M_{\text{ГР}z}.$$

Опуская промежуточные расчеты, приведенные в [4], дополняя уравнения (4) уравнениями для момента двигателя (5), получим уравнения (6):

$$M_{\partial x}=-I\Delta\dot{\Omega}_1-\nu_0 I\Delta\Omega_2+I\Omega_{30}(\nu_0\varepsilon_1-\dot{\varepsilon}_2);$$
$$M_{\partial y}=-I\Delta\dot{\Omega}_2+\nu_0 I\Delta\Omega_1+I\Omega_{30}(\dot{\varepsilon}_1+\nu_0\varepsilon_2); \quad (5)$$
$$M_{\partial z}=-I\Delta\dot{\Omega}_3.$$

$$J_{ax}\cdot\ddot{\varepsilon}_1+\nu_0\cdot\dot{\varepsilon}_2(J_{ax}-J_{az}+J_{ay}+I\frac{\Omega_{30}}{\nu_0})+\nu_0^2\cdot\varepsilon_1(4(J_{az}-J_{ay})-I\frac{\Omega_{30}}{\nu_0})=$$
$$=-k_{M1}I\Delta\dot{U}_1-k_{M2}\nu_0 I\Delta U_2+M_{\textit{в}x};$$
$$J_{ay}\cdot\ddot{\varepsilon}_2-\nu_0\cdot\dot{\varepsilon}_1(J_{ay}+J_{az}-J_{ax}+I\frac{\Omega_{30}}{\nu_0})+\nu_0^2\cdot\varepsilon_2(J_{ax}-J_{az}-I\frac{\Omega_{30}}{\nu_0})= \quad (6)$$
$$=-k_{M2}I\Delta\dot{U}_2+k_{M1}\nu_0 I\Delta U_1+M_{\textit{в}y};$$
$$J_{az}\cdot\ddot{\varepsilon}_3+3\nu_0\cdot\varepsilon_3(J_{ax}-J_{ay})=-k_{M3}I\Delta\dot{U}_3+M_{\textit{в}z}.$$

Дополним данные уравнения уравнениями (7) и (8):

$$U=\Delta\varepsilon_i\cdot K_P+\Delta\varepsilon_i\cdot\frac{K_u}{p}; \quad (7)$$

$$\Delta\varepsilon_i=\varepsilon_{0i}-\varepsilon_i. \quad (8)$$

С использованием системы уравнений (6), а также уравнений (7) и (8), и с учетом того, что система разгрузки обеспечивает условие $K_{10}=K_{20}=0$ [4], была построена многосвязная система, изображенная на рис.6.

В схемах, изображенных на рис. 6 и рис. 7, примем следующие обозначения: ε_1 – выход канала по управлению углом крена; ε_2 – выход канала по управлению углом рыскания; $\varepsilon_{01},\varepsilon_{02}$ – заданные значения по каждому из каналов; МКР1 и МКР2 – межконтурные регуляторы в гироскопических каналах; $W_{\textit{Дв}}$ – передаточная функция двигателя. Зададимся начальными условиями, например $\varepsilon_{01}=0{,}5\,\textit{рад}$, $\varepsilon_{02}=1{,}3\,\textit{рад}$, которые подавались на задающие входы многосвязной системы; на входы возмущающих воздействий подавался ноль. Оптимальные параметры ПИ-регулятора (УУ в схеме на рис. 6 и рис. 7) в каналах крена и рыскания определены при помощи средств библиотеки Matlab: Simulink Design Optimization. Для канала крена $k_p = \text{-}12344.6, k_i = \text{-}233.303$, рыскания – $k_p = \text{-}26835.1$, $k_i = \text{-}52837.6$.

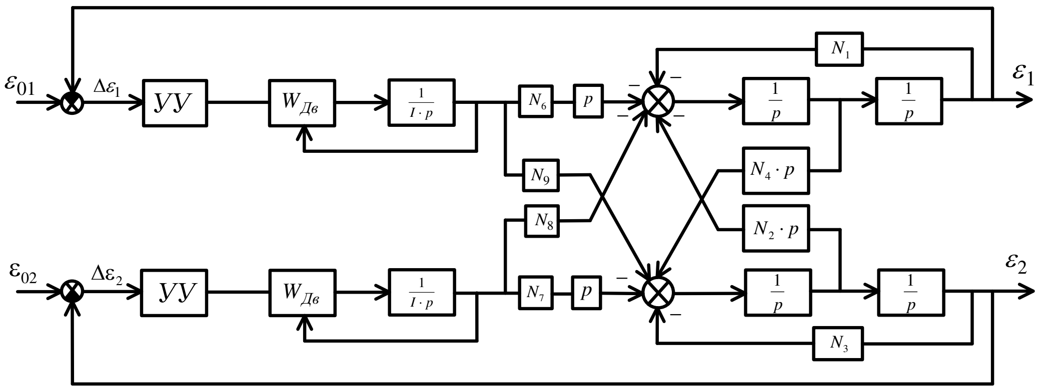

Рис. 6. Структурная схема многосвязной системы управления КЛА с межконтурными регуляторами

После нормализации уравнений (6) коэффициенты в схеме примут вид

$$N_1 = \frac{\nu_0^2\left(4(J_{az} - J_{ay}) - I\dfrac{\Omega_{30}}{\nu_0}\right)}{J_{ax}}; N_2 = \frac{\nu_0\left(J_{ax} - J_{az} + J_{ay} + I\dfrac{\Omega_{30}}{\nu_0}\right)}{J_{ax}};$$

$$N_3 = \frac{\nu_0^2\left(J_{ax} - J_{az} - I\dfrac{\Omega_{30}}{\nu_0}\right)}{J_{ax}};\ N_4 = \frac{\nu_0\left(J_{ay} + J_{az} - J_{ax} + I\dfrac{\Omega_{30}}{\nu_0}\right)}{J_{ax}}; \qquad (9)$$

$$N_5 = \frac{3\nu_0 \cdot (J_{ax} - J_{ay})}{J_{ax}}; N_6 = \frac{1}{J_{ax}};\ N_7 = \frac{1}{J_{ax}}.$$

Для повышения эффективности динамических показателей многосвязной системы (рис. 6) предлагается использовать межконтурные регуляторы с ПИ- и ПИД-законом регулирования в гироскопических связях (рис. 7).

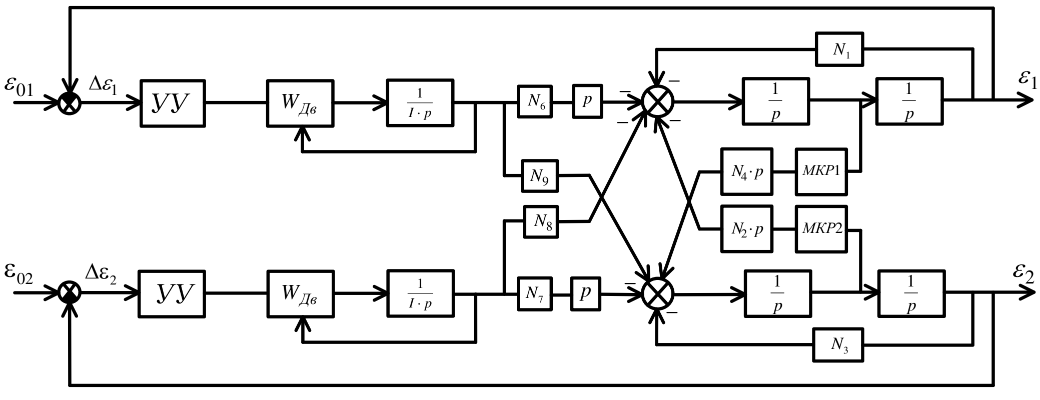

Рис. 7. Структурная схема многосвязной системы управления КЛА с межконтурными регуляторами

Проведены исследования данной многосвязной системы на имитационной модели, построенной в Simulink, с применением межконтурных ПИ- и ПИД-регуляторов в гироскопических каналах. Результаты исследования приведены на рис. 8 и рис. 9.

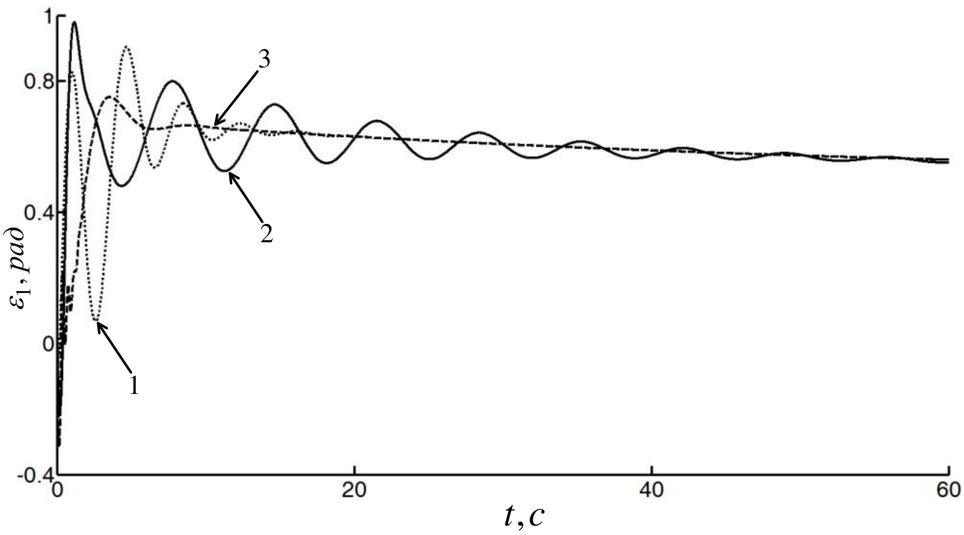

Рис. 8. Переходный процесс по каналу крена: 1 – с использованием ПИ МКР; 2 – без использования МКР; 3 – с использованием ПИД МКР

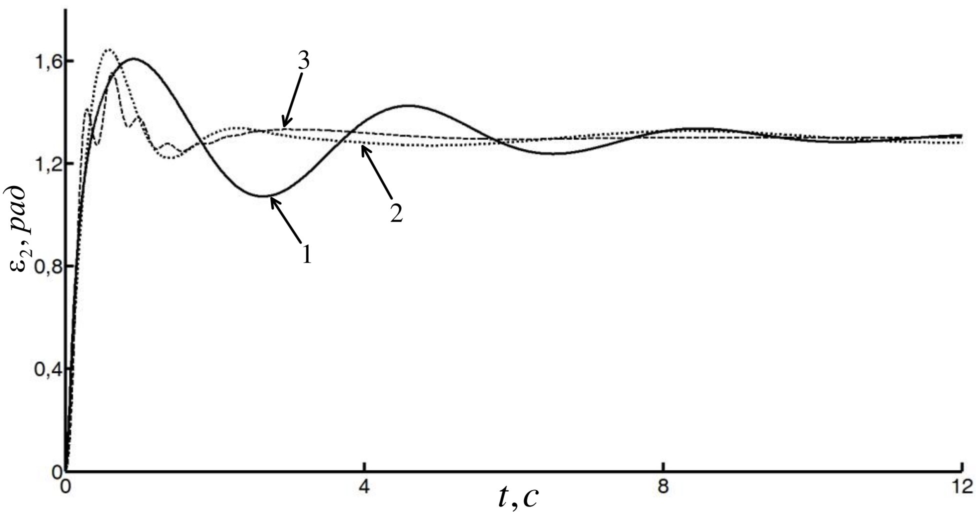

Рис. 9. Переходный процесс по каналу рыскания: 1 – с использованием ПИ МКР; 2 – без использования МКР; 3 – с использованием ПИД МКР

Вывод: после проведенных исследований для многосвязной системы управления КА можно дать следующие рекомендации. Для достижения наилучшего качества управления системой ориентации и стабилизации КА рекомендуется использовать в гироскопических связях межконтурные регуляторы с ПИД-законом регулирования. Оптимальная схема включения: одновременное использование МКР1 и МКР2.

В заключение можно отметить, что предложенные структуры и регуляторы в них подтвердили работоспособность. Приведенные семейства динамических характеристик доказывают эффективность применяемых структур и их высокое быстродействие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чостковский Б.К., Колпащиков С.А.* Синтез цифрового регулятора терминальной системы позиционирования динамического объекта // Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества: I Козловские чтения. – 2009. – С. 96-98.
2. *Денисов В.Ю., Чостковский Б.К.* Двухконтурная система управления обобщенным параметром // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2012. – Вып. 36.
3. *Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л.* Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 2000. – 475 с.
4. *Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г.* Управление космическими аппаратами. – М.: Машиностроение, 1974. – 340 с.
5. *Мельников В.Н.* Управление ориентацией космического аппарата. Обзор. – М., 2011.
6. *Белецкий В.В.* Движение искусственного спутника Земли относительно центра масс. – М.: Наука, 1965. – 416 с.
7. *Петров В.П.* Ориентация в космосе // Наука и жизнь. – 1958. – № 9. – С. 7-12.
8. *Бухгольц Н.Н.* Основной курс теоретической механики. Ч. 2. – М,: Наука, 1966. – 332 с.
9. *Гавриленко О.И., Резникова О.В., Лученко О.А.* Оптимальная система стабилизации космического летательного аппарата с электромаховичными исполнительными органами // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 6 (32).

Статья поступила в редакцию 2 октября 2014 г.

POSITIONING CONTROL SATELLITE

B.K. Chostkovsky[1], V.U. Denisov[2]

[1] Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

[2] Samara Space Center “Progress”
18, Zemetza St., Samara, 443009, Russian Federation

Use of structural solutions to control of monoaxial and triaxial positioning system of satellite. One investigate the problem of application of intercontour regulators in a multivariable control system.The methods of synthesis of monoaxial and triaxial systems orientation. One solve the problem of improving the dynamic characteristic by introduction a correcting circuit for monoaxial coordination system; intercontour regulators introduced in gyroscopic channels of multivariable control system of positioning in three coordinates .

Keywords: *multivariable control system, optimization c regulators, satellite , positioning, orientation and stabilization system, double-loop control system.*

Boris K. Chostkovsky (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vladimir U. Denisov, Engeneer.