

УДК 681.513.1

## КОМПЕНСАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ И ВЗАИМОВЛИЯНИЯ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ И СТАБИЛИЗАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© А. З. Асанов

*МИРЭА — Российский технологический университет,  
119454, Москва, просп. Вернадского, 78  
E-mail: asanov@mirea.ru*

Для решения проблемы компенсации влияния возмущения на угловое положение космического аппарата предложена инженерная методика синтеза алгоритма управления маховичной системой ориентации и стабилизации, основанная на обеспечении селективной инвариантности системы управления и схемы противонакопления сигнала. Эффективность метода подтверждена численным моделированием.

*Ключевые слова:* космический аппарат, ориентация, стабилизация, маховичная система, алгоритм управления, принцип внутренней модели, схема противонакопления.

DOI: 10.15372/AUT20220402

**Введение.** Успех работ, проводимых в космическом пространстве с помощью космического аппарата (КА), во многом зависит от эффективности систем ориентации и стабилизации (СОС) [1], и возникает необходимость в надёжных и точных, работающих в течение длительного времени с минимальными затратами энергии системах ориентации и стабилизации, управляющих угловым положением КА [2]. На автоматических космических аппаратах дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ), предназначенных для метеорологических, геофизических наблюдений и изучения природных ресурсов Земли, широко применяются маховичные системы ориентации и стабилизации [3, 4]. Исполнительными органами маховичных систем ориентации КА ДЗЗ являются специальные электрические двигатели-маховики (ДМ). Они управляют угловым положением космических аппаратов путём обмена кинетическим моментом между инерционными вращающимися массами и корпусом космического аппарата. Изменение кинетического момента маховичной системы осуществляется за счёт регулирования скорости вращения маховиков. Таким образом, существует возможность управления угловой скоростью (углом) поворота КА около одной из осей координат моментом ( $M$ ) космического аппарата через изменения электромагнитного момента ( $M_э$ ) электродвигателя, управляемого, в свою очередь, изменением напряжения  $u_y$ .

Для ориентации космического аппарата необходимо управлять его угловым положением вокруг трёх осей координат. Чтобы получить независимые управляющие моменты по трём осям космического аппарата, на его борту устанавливаются три (минимально, но возможно, и более) электрических двигателя-маховика с осями вращения, параллельными трём осям координат  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ . Статическая характеристика линейного двигателя-маховика имеет насыщение по моменту [3], но в зоне линейности момент пропорционален сигналу управления  $M = k_M u$ . Это, в свою очередь, позволяет реализовать в маховичных системах ориентации линейные алгоритмы управления, например, при стабилизации КА.

Обобщённая функциональная схема маховичной системы ориентации и стабилизации (без системы разгрузки) космического аппарата приведена на рис. 1. Здесь использованы

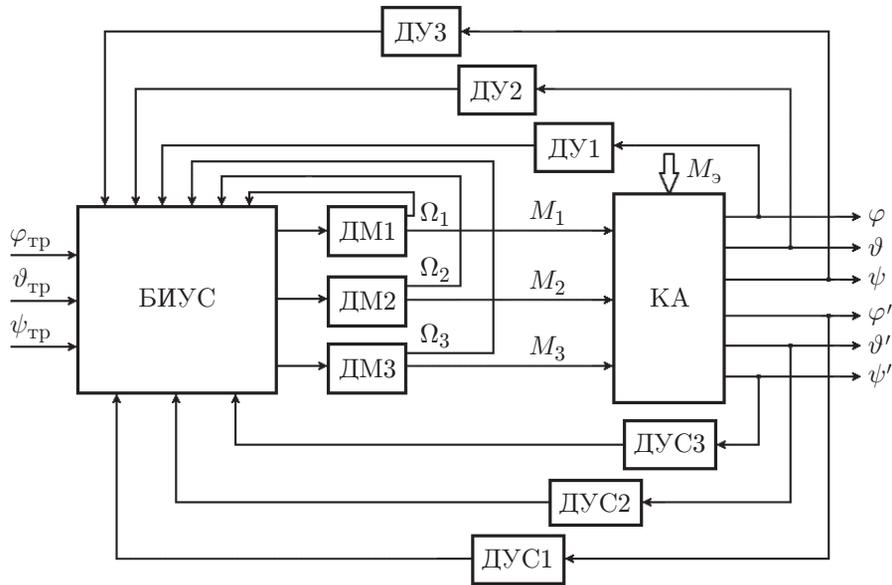


Рис. 1. Обобщённая функциональная схема маховичной системы ориентации и стабилизации (без системы разгрузки) космического аппарата

обозначения: БИУС — бортовая информационно-управляющая система, ДМ — двигатели-маховики, ДУ — датчики углов, ДУС — датчики угловых скоростей. Очевидно, что данная система ориентации и стабилизации КА представляет собой многосвязную в общем случае нелинейную систему управления. Особенности рассматриваемой системы заключаются в том, что каналы управления по различным углам ориентации не являются автономными (развязанными) из-за гироскопических составляющих вектора управляющего момента, которые появляются при вращении маховичной системы вместе с КА [4]. Кроме того, в отличие от поступательного движения осей ориентации пространственное угловое движение КА не разделяется на независимые движения относительно трёх угловых координат. Принято считать, что его можно разделить на два движения: по координате  $\theta$  (угол тангажа) и неразделимое по координатам  $\varphi$  (угол крена) и  $\psi$  (угол рыскания).

Внешние возмущающие моменты, воздействующие на космический аппарат, непостоянны — они зависят от характера и параметров траектории КА, состояния верхних слоёв атмосферы, ориентации КА в пространстве и пр. Помимо внешних возмущающих моментов, на КА могут воздействовать и внутренние возмущающие моменты, обусловленные включением/выключением различных бортовых устройств (электродвигателей, вентиляторов и т. п.), которые могут быть источниками погрешности стабилизации КА. В общем случае внешние и внутренние возмущающие моменты на КА, взаимовлияние каналов управления могут быть весьма существенными и влиять на точность стабилизации космического аппарата. Для эффективной работы СОС недетерминированные возмущения могут быть учтены в системе с помощью наблюдателей неизмеряемых величин [5, 6], влияния детерминированных и/или квазидетерминированных возмущений на систему, а также могут быть парированы соответствующим синтезом алгоритма управления СОС.

**Постановка задачи.** В работе ставится задача синтеза алгоритма управления маховичной системой ориентации и стабилизации КА ДЗЗ, учитывающего особенности объекта управления (наличие зоны существенной линейности в статической характеристике ДМ, построенных на бесконтактных двигателях постоянного тока, наличие селективной инвариантности системы к определённому классу возмущений и ограничений исполнительных механизмов СОС КА).

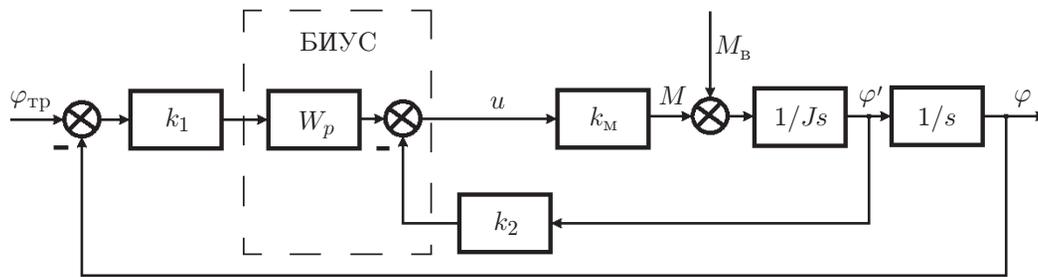


Рис. 2. Структурная схема одиночного канала линейной маховичной системы

Учитывая, что речь идёт о синтезе нелинейного алгоритма управления, предлагается выполнить процедуру синтеза управления в виде последовательности следующих этапов: синтез линейного алгоритма управления с одновременным обеспечением селективной инвариантности системы к определённому классу возмущений, учёт в управлении ограничений исполнительных механизмов системы с одновременным обеспечением противонакопления сигнала в интегрирующих элементах системы.

**Алгоритм управления.** Динамика одиночной линейной маховичной СОС КА в режиме стабилизации при допущении, что датчики угла и угловой скорости являются безынерционными в силу того, что их быстродействие много выше скорости процессов угловой стабилизации КА, может быть представлена следующими математическими соотношениями:

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M + M_B, \quad M_B = M_{\text{внутр возм}} + M_{\text{внеш возм}} + M_{\text{взаим возм}},$$

где  $M_{\text{внутр возм}}$  — внутренние возмущающие моменты КА,  $M_{\text{внеш возм}}$  — внешние возмущающие моменты КА,  $M_{\text{взаим возм}}$  — взаимные возмущения каналов управления КА. Сигнал управления  $u$  на ДМ описывается выражением

$$u = k_1(\varphi - \varphi_{\text{тр}}) - k_2\varphi',$$

где  $k_1$  — коэффициент передачи сигнала углового отклонения,  $k_2$  — коэффициент передачи сигнала угловой скорости.

В линейной области статической характеристики двигателя-маховика управляющий момент ДМ можно представить как  $M = k_M u$ , где  $k_M$  — крутизна (коэффициент преобразования) линейной части статической характеристики ДМ.

Структурная схема, соответствующая представленной выше линеаризованной (исключена нелинейность характеристики ДМ — ограничение по току) математической модели одиночного канала линейной маховичной системы, представлена на рис. 2 [3]; здесь дополнительно введён блок планируемого регулятора  $W_p(s)$  канала управления.

**Модели возмущений и реакции системы.** Сигналы рассмотренных выше возмущений и взаимовлияний каналов управления КА (далее — возмущения) характеризуются тем, что они имеют постоянный и/или квазипостоянный вид [7], возникают и исчезают с той или иной конечной скоростью и могут быть представлены как выходы линейных динамических систем. Модель таких возмущений следующая:

$$M_B(s) = \frac{N(s)}{D(s)} m_B,$$

где  $m_B$  — некоторое постоянное или квазипостоянное неизмеряемое воздействие, возникающее в неизвестный момент времени,  $D(s)$  — полином, формирующий возмущение, определяемый выражением

$$D(s) = s^q + \sum_{i=0}^{q-1} d_i s^i.$$

Этот полином соответствует знаменателю преобразования Лапласа от возмущения  $m_B(t)$  и может быть разложен на множители в соответствии с составляющими возмущения.

Описание объекта управления имеет вид

$$G(s) = \frac{k_M}{s(Js + k_2 k_M)} = \frac{k_M/J}{s(s + k_2 k_M/J)} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0}{s(s + a_1)}.$$

Кроме того, положим, что  $W_p(s) = P(s)/L(s)$ , где  $P(s)$  и  $L(s)$  — некоторые полиномы, образующие передаточную функцию проектируемого регулятора одиночного канала линейной маховичной системы.

Составляющую выходной реакции системы, обусловленную возмущениями на входе объекта управления, можно представить соотношением

$$\varphi_B(s) = \frac{G(s)}{1 + k_1 G(s) W_p(s)} \frac{1}{k_M} M_B(s) = \frac{1}{k_M} \frac{B(s)L(s)}{A(s)L(s) + k_1 B(s)P(s)} \frac{N(s)}{D(s)} m_B.$$

Из этого выражения видно, что составляющие выходного сигнала, обусловленные возмущениями, будут равны нулю, когда полином  $D(s)$  является сомножителем полинома  $L(s)$  знаменателя передаточной функции регулятора.

**Обеспечение селективной инвариантности.** Известно [8], что обеспечить селективную инвариантность системы к некоторому воздействию возможно при условии, что система содержит спектральную модель воздействия (в этом состоит суть так называемого принципа внутренней модели). Это условие может быть учтено на стадии синтеза регулятора контура управления, например, при решении задачи о назначении полюсов системы управления [9].

В нашей задаче о назначении полюсов системы управления требуется выполнение условия

$$A(s)L(s) + k_1 B(s)P(s) = A_{ref},$$

где  $A_{ref}$  — полином с заданным (эталонным) спектром полюсов.

В свою очередь, реализация принципа внутренней модели при  $L(s) = D(s)\bar{L}(s)$  приводит к соотношению

$$A(s)D(s)\bar{L}(s) + k_1 B(s)P(s) = A_{ref}. \quad (1)$$

При этом, если степень полинома  $A(s)$  — порядок математической модели объекта управления — равняется  $n$ , то эталонный полином  $A_{ref}(s)$  может быть произвольно задан [10] тогда и только тогда, когда его степень равняется  $(2n - 1 + q)$ , где  $q$  — степень формирующего полинома  $D(s)$ .

Пусть возмущающее воздействие описывается выражением  $M_B(t) = k_B(1 - e^{-t/\alpha})$ , что соответствует большинству возмущающих воздействий, встречающихся в практике управления ( $k_B$  и  $\alpha$  — параметры, характеризующие амплитуду возмущения и скорость

нарастания возмущения). Таким образом, полином, формирующий возмущение, определяется выражением

$$D(s) = s^q + \sum_{i=0}^{q-1} d_i s^i = s^2 + \frac{1}{\alpha} s = s(s + d_1), \quad q = 2, \quad d_1 = \frac{1}{\alpha}.$$

Для рассматриваемой модели канала управления маховичной СОС степень полинома  $A(s) = 2$  (порядок математической модели объекта управления). Для произвольности выбора эталонного полинома  $A_{ref}(s)$  требуется, чтобы его степень  $(2n - 1 + q) = 5$  (или была выше). Тогда для синтезируемого регулятора можно принять

$$L(s) = D(s)\bar{L}(s) = s(s + d_1)(l_1 s + l_0), \quad P(s) = p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s + p_0.$$

Пусть, к примеру, в качестве  $A_{ref}$  используется многочлен с кратными корнями вида

$$A_{ref}(s) = (\beta s + 1)^5 = \beta^5 s^5 + 5\beta^4 s^4 + 10\beta^3 s^3 + 10\beta^2 s^2 + 5\beta s + 1. \quad (2)$$

Уравнение (1) для определения неизвестных коэффициентов приобретает вид

$$s(s + a_1)s(s + d_1)(l_1 s + l_0) + k_1 b_0(p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s + p_0) = A_{ref},$$

из которого следует система алгебраических уравнений (представлена в виде матричного уравнения) для нахождения неизвестных коэффициентов при задании  $A_{ref}(s)$ , как в (2):

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 + d_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 d_1 & a_1 + d_1 & k_1 b_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 d_1 & 0 & k_1 b_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_1 b_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_1 b_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_0 \\ p_3 \\ p_2 \\ p_1 \\ p_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta^5 \\ 5\beta^4 \\ 10\beta^3 \\ 10\beta^2 \\ 5\beta \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Найденные из этого уравнения числовые параметры входят в алгоритм управления, представленный в форме передаточной функции

$$W_p(s) = \frac{P(s)}{L(s)} = \frac{p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s + p_0}{s(s + d_1)(l_1 s + l_0)}.$$

**Пример.** Пусть рассматривается функционирование одиночного канала СОС с маховичной системой в одном из режимов полёта КА. Параметры элементов канала управления [10]:  $k_1 = 300$ ,  $k_2 = 2000$ ,  $k_M = 0,5$ ,  $J = 8000$ ,  $\varphi_{TP} = 0,3$  рад, нелинейность — насыщение по току ДМ  $|I_{max}| = 2$  А. Параметры внешнего возмущения  $k_B = 10$ ,  $\alpha = 10$ ,  $\beta = 8$ , начало возмущения на 100 с.

Синтезированное по приведённой выше процедуре управляющее устройство имеет передаточную функцию

$$W_p(s) = \frac{71,67s^3 + 19,38s^2 + 1,63s + 0,04}{s(25s^2 + 12,5s + 1)}. \quad (3)$$

Реакции исходной линеаризованной (исключён нелинейный элемент «насыщение», характерный для ДМ) системы управления на ступенчатое воздействие 0,3 [рад] и системы

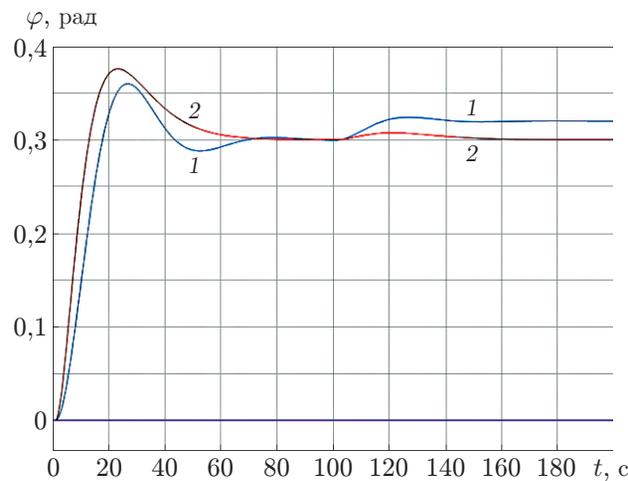


Рис. 3. Реакции исходной линейризованной системы управления (кривая 1) и системы с компенсацией возмущения в установившемся режиме (кривая 2)

с компенсацией возмущения (ступенчатое воздействие величиной 3 усл. ед. на ДМ — величина воздействия назначена специально для демонстрации эффекта компенсации) в установившемся режиме представлены на рис. 3.

Из графиков нетрудно увидеть, что цель — компенсация возмущения в установившемся режиме — достигается в полной мере, влияние возмущения заметно только на этапе переходного процесса, но и это влияние существенно меньше, чем в системе без компенсации возмущений.

**Накопление — противонакопление.** Исполнительный механизм СОС КА практически всегда имеет ограничения на максимальное значение и/или скорость нарастания сигнала, что приводит к отличиям от функционирования системы, определяемой полностью линейным описанием. Вместе с тем на борту КА желательно обеспечить достижение исполнительными механизмами ограничений, максимальное использование имеющихся у них возможностей. «Цена» за использование исполнительного механизма в предельных (нелинейных) режимах — накопление интегратором некоторой величины. Помимо всего прочего, интеграторы применяются в системах управления для придания свойства астатизма системе, чтобы исключить установившиеся ошибки (см. регулятор (3)).

Недостатком синтезированного регулятора (3) может стать обстоятельство, когда сигнал входит в насыщение (ограничение), интегратор в регуляторе продолжит интегрировать. Таким образом, состояние интегратора может достигнуть недопустимо высокой величины, что ведёт, в свою очередь, при возвращении в линейную область к большим значениям начальных условий — к большому (плохому) переходному процессу (эффект накопления).

Известен [11, 12] ряд способов защиты от накопления. Но применение этих методов возможно при строгом выполнении двух условий: входным сигналом регулятора является фактический (т. е. ограниченный) сигнал, регулятор должен быть устойчивым при управлении фактическим входным сигналом объекта.

Эти условия выполняются, если регулятор бисобственный и минимально-фазовый, например, как в (3), где  $\{-0,0431; -0,1136; \pm 0,0052j\}$  — нули и  $\{0; -0,40; -0,10\}$  — полюсы. Тогда передаточную функцию регулятора можно представить через элемент прямой передачи (усилительный элемент)  $W_{p\infty}$  и строго собственную передаточную функцию  $\tilde{W}_p(s)$ :

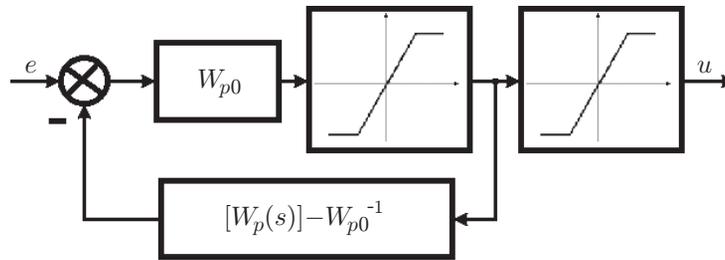


Рис. 4. Структурная схема бисобственного регулятора с ограничением в форме обратной связи

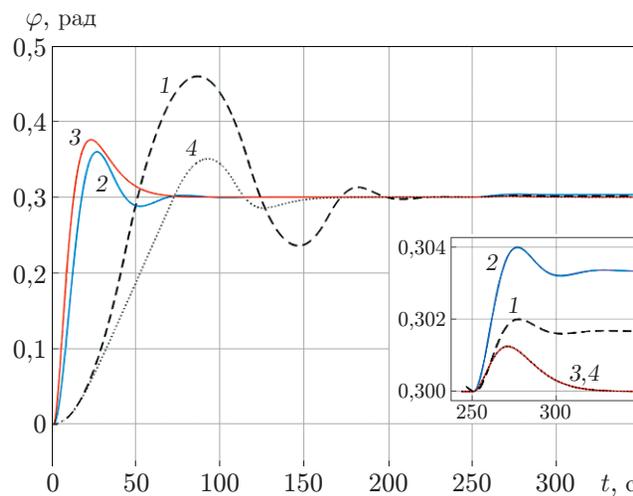


Рис. 5. Реакции маховичной СОС различной структуры (кривая 1 — исходная нелинейная система, 2 — линеаризованная система, 3 — скорректированная система, 4 — скорректированная нелинейная система с противонакоплением)

$$W_p(s) = W_{p0} + \bar{W}_p(s) = 2,867 + \frac{(-16,46s^2 - 1,24s + 0,04)}{s(25s^2 + 12,5s + 1)}.$$

Регулятор с такой передаточной функцией, как показано в [12], может быть реализован в форме обратной связи, структурная схема которой представлена на рис. 4.

Моделирование канала управления маховичной СОС КА с синтезированным алгоритмом управления (регулятором) с ограничением выходного сигнала исполнительного механизма и схемой противонакопления показало работоспособность и эффективность рассмотренной процедуры построения алгоритма управления СОС КА (рис. 5). На рисунке представлены реакции нескольких вариантов рассматриваемой системы: нелинейная/линеаризованная — системы с/без нелинейности типа «ограничение» в модели ДМ; скорректированная линеаризованная — система с регулятором, обеспечивающим селективную избирательность системы; скорректированная нелинейная — система с упомянутым регулятором и специальной схемой противонакопления. Числовые параметры, которые использовались при моделировании (помимо ранее представленных), были следующие: возмущение на ДМ — ступенчатое воздействие с амплитудой 0,5 В на 250-й с; нелинейные элементы схемы противонакопления в регуляторе имели ограничение по модулю, равное 10 (теоретически это значение ничем не обусловлено, определяется при настройке регулятора

исходя из требований к качеству переходного процесса системы и обеспечения предельных режимов работы ДМ). Из графиков видно, что использование рассмотренного регулятора с противонакоплением позволяет уменьшить установившуюся ошибку, вызванную возмущением на объект, на 1–1,5 град.

**Заключение.** Использование предложенной комбинированной процедуры синтеза алгоритма управления маховичной системой ориентации и стабилизации, основанного на обеспечении селективной инвариантности системы управления и схемы противонакопления сигнала, показало свою эффективность, которая подтверждена численным моделированием.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Попов В. И.** Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1986. 184 с.
2. **Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А.** Управление угловым положением летательного аппарата // Автометрия. 2015. **51**, № 5. С. 35–41.
3. **Васильев В. Н.** Системы ориентации космических аппаратов. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. 310 с.
4. **Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов** /Под общ. ред. Е. Ю. Микрина. М.: Ин-т проблем управления РАН им. В. А. Трапезникова. М.: Наука, 2006. 581 с.
5. **Асанов А. З.** Синтез наблюдателя нагрузки электромеханической системы // Изв. высших учебных заведений. Авиационная техника. 2003. № 2. С. 17–21.
6. **Асанов А. З., Демьянов Д. Н.** Аналитический синтез функциональных наблюдателей для систем с сигнальными возмущениями // Автометрия. 2014. **50**, № 6. С. 111–119.
7. **Маштаков Я. В., Ткачев С. С.** Влияние возмущений на точность стабилизации спутника ДЗЗ. М., 2016. 31 с. (Препр. ИПМ им. М. В. Келдыша; № 18).
8. **Francis B. A., Wonham W.** The internal model principle of control theory // Automatica. 1976. **12**. P. 457–465.
9. **Гайдук А. Р.** Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). М.: Физматлит, 2012. 360 с.
10. **Григорьев В. В., Журавлёва Н. В., Лукьянова Г. В., Сергеев К. А.** Синтез систем автоматического управления методом модального управления. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 108 с.
11. **Karoor N., Teel A. R., Daoutidis P.** On anti-integrator-windup and global asymptotic stability // Proc. of the 13th World Congress of IFAC. San Francisco, USA, 30 June - 5 July, 1996. Vol. D. P. 67–72.
12. **Гудвин Г. К., Гребе С. Ф., Сальгадо М. Э.** Проектирование систем управления. Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.

*Поступила в редакцию 11.03.2022*

*После доработки 13.06.2022*

*Принята к публикации 24.06.2022*