

СИНТЕЗ УГЛА ТАНГАЖА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА ТЕХНОЛОГИИ ВЛОЖЕНИЯ СИСТЕМ

SYNTHESIS OF THE PITCH ANGLE OF THE AIRCRAFT STABILIZATION SYSTEM USING THE METHOD OF SYSTEMS EMBEDDING TECHNOLOGY

**K. Goncharov
S. Lukyanov
D. Kulakov**

Summary. The increasing complexity of processes in science, technology and production leads to new approaches to the study of automatic control systems based on matrix methods. Methods of the theory of linear dynamical systems remain one of the most powerful tools of modern control theory in solving problems of analysis and synthesis of control systems of moving objects. Matrix methods for the study of linear systems are promising areas for the development of analysis and synthesis of dynamic objects, including studies of stabilization of aircraft systems.

Keywords: synthesis, systems, control, stabilization, embedding, matrices.

Гончаров Кирилл Николаевич
Инженер-конструктор 3 категории
АО «ВПК «НПО машиностроения»
K.n.goncharov@vpk.npomash.ru

Лукьянов Сергей Львович
Начальник отдела
АО «ВПК «НПО машиностроения»
nio406@vpk.npomash.ru

Кулаков Дмитрий Николаевич
Заместитель начальника отдела
АО «ВПК «НПО машиностроения»
nio406@vpk.npomash.ru

Туманян Оганес Каренович
Начальник сектора
АО «ВПК «НПО машиностроения»
nio406@vpk.npomash.ru

Аннотация. Возрастающая сложность процессов в науке, технике и производстве приводит к новым подходам исследования систем автоматического управления на основе матричных методов. Одним из наиболее мощных инструментов современной теории управления при решении задач анализа и синтеза систем управления движущимися объектами остаются методы теории линейных динамических систем. Матричные методы исследования линейных систем являются перспективными направлениями развития анализа и синтеза динамических объектов, в том числе исследований стабилизации систем летательных аппаратов.

Ключевые слова: синтез, системы, управление, стабилизация, вложение, матрицы.

При проектировании системы стабилизации аэродинамических летательных аппаратов (ЛА) ключевым является учет динамики собственно ЛА, как объекта управления и особенностей динамики привода его исполнительных органов, как основного элемента системы, выполняющего одновременно функции усилителя мощности и исполнительного механизма [1].

Для рассмотрения синтеза систем стабилизации по углу тангажа ЛА (ракеты) рассмотрим метод технологии вложения систем, для дальнейшего рассмотрения сложных многосвязных систем.

Технологией вложения систем названа универсальная совокупность методов и приемов решения задач

теории систем, основанная, прежде всего, на современных достижениях алгебры и сводящаяся к определению условий, при которых сложно организованная (многосвязная, многомерная, матричная, составная) система ведет себя аналогично относительно более простой (односвязной, заданной, хорошо изученной или доступной для глубокого исследования) системе. [2].

Технология вложения, по своему физическому смыслу, оперирует сложноорганизованными многосвязными системами и сопоставляет их с относительно простыми, хорошо изученными, системами, т.е. сложные (многосвязные) системы «вкладываются» в простые системы, в которых интересующие нас задачи разрешимы [3].

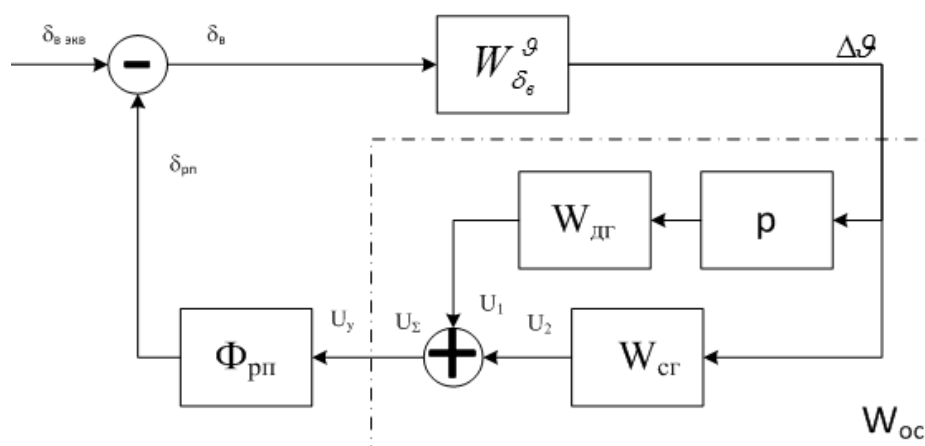


Рис. 1 Функциональная схема ССт

Этапы технологии вложения систем

Технология вложения систем предполагает последовательное выполнение трех этапов [4].

1. На первом этапе формализуется общая структура исследуемой или синтезируемой системы. Это осуществляется приведением математических моделей всех подсистем и связей между ними к матрице специальной конструкции — проматрице $\Omega(p)$ решаемой задачи [5]. Проматрица всегда имеет квадратный вид и является обратимой. Если вычислить обратную к проматрице матрицу, то она будет содержать все возможные передаточные функции линейной динамической системы. Проматрица обладает, во-первых, некоторыми обязательными общими свойствами, а во-вторых, характеристическими свойствами, позволяющими с нужной полнотой представлять свойства как системы в целом, так и различных ее подсистем. Поэтому проматрица является единственным объектом исследования, который исчерпывающим образом характеризует все свойства линейной динамической системы.
2. На втором этапе формируется так называемое тождество вложения, которое устанавливает выборочную эквивалентность исследуемой системы и некоторой другой системы $\omega(p)$, обладающей известной или желаемой совокупностью свойств [4].
3. На третьем этапе осуществляется переход от тождества вложения к расчетным формулам. По виду матриц α , β и ω составляются матричные уравнения, решения которых либо не существует (поставленная задача неразрешима), либо требует выполнения тех соотношений (значений коэффициентов матриц), которые являются этим решением [4].

Описание работы системы управления

Система автоматической стабилизации (ССт) является одной из основных частей системы управления полётом. ССт — это совокупность устройств, расположенных на борту ЛА, поддерживающих требуемое угловое положение или установившееся угловое движение ЛА [6]. Функциональная схема представлена на Рис. 1.

Применение на ЛА ССт позволяет улучшать устойчивость и управляемость ЛА, обеспечивать правильность выдачи команд в каналы управления ЛА при самонаведении и телеуправлении, уменьшении влияния перекрёстных связей между каналами ЛА и повышать точность наведения ЛА на цель. [7, 8]

Угловая стабилизация обычно осуществляется раздельно в каждой из трех плоскостей — тангажа, рысканья и крена [9, 10].

В качестве рулевой машинки будем использовать электрогидравлический силовой привод, для которого возьмем известную передаточную функция, составленную из математической модели усилителя-сумматора, гидроусилителя рулевого привода, исполнительного механизма и силовой проводки. [11]

Получается:

$$W_{PP}(p) = \frac{0,046}{0,00013156 \cdot p^2 + 0,01337 \cdot p + 1}$$

Переведем передаточную функцию рулевого привода в пространство состояний для синтеза угла тангажа летательного аппарата с помощью метода технологии вложения систем (первый шаг) [4]:

Представим отношение $\frac{\delta(p)}{\sigma(p)}$ в виде:

$$\frac{\delta(p)}{\sigma(p)} = \frac{\delta(p) z(p)}{z(p) \sigma(p)} = W_1(p)W_2(p),$$

$$W_1(p) = \frac{\delta(p)}{z(p)} = \frac{0,046}{1},$$

$$W_2(p) = \frac{z(p)}{\sigma(p)} = \frac{1}{0,00013156 \cdot p^2 + 0,01337 \cdot p + 1}$$

Передаточная функция $W_1(p)$ соответствует дифференциальному уравнению

$$\delta(t) = 0,046z(t)$$

Передаточная функция $W_2(p)$ соответствует дифференциальному уравнению

$$\sigma(t) = 0,00013156 \cdot \frac{d^2z}{dt^2} + 0,01337 \cdot \frac{dz}{dt} + z$$

Вводя новые переменные состояния

$$x_1 = z, x_2 = \frac{dz}{dt}$$

И учитывая связь между ними $\frac{dx_1}{dt} = x_2$

получаем систему

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{1}{0,00013156}x_1 - \frac{0,01337}{0,00013156}x_2 + \frac{1}{0,00013156}u \\ y = 0,046x_1 \end{cases}$$

Которая записывается в форме модели в пространстве состояний с матрицами:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{0,00013156} & -\frac{0,01337}{0,00013156} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{0,00013156} \end{bmatrix}, C = [0,046 \quad 0], D = 0$$

Упрощенная математическая модель летательного аппарата

В общем случае, для описания движения ЛА в атмосфере используется описание в виде дифференциальных уравнений [12, 13] которые представляют:

1. Величину и направление вектора скорости ЛА — уравнения сил
2. Величину и направление вектора угловой скорости — уравнения моментов
3. Уравнения, связывающие производные углов с проекциями угловой скорости на связанные оси
4. Уравнения, связывающие сферические координаты
5. Уравнение, описывающее изменение массы, и геометрические соотношения

Примем допущения, что ЛА симметричен относительно продольной плоскости, в невозмущенном движении боковые кинематические параметры и отклонения органов управления боковыми движениями являются малыми величинами, производные от продольных параметров также являются малыми, отклонения параметров малы относительно их невозмущенных значений.

Далее рассмотрим модель короткопериодического движения в продольном канале ЛА. Для этого примем изменение скорости близкое к нулю. Также отбросим члены, отвечающие за влияние запаздывание схода потока, считая, что это не оказывает существенного влияния на характер движения ЛА. Тогда при действии возмущающего момента получим следующую модель [14]

$$\begin{cases} \ddot{\theta} + a_{11}\dot{\theta} + a_{12}\alpha = -a_{13}\delta_e + a_{15}M_{z_{\text{вз}}}, \\ \dot{\Theta} = a_{42}\alpha, \\ \vartheta = \Theta + \alpha. \end{cases}$$

Система аэродинамических коэффициентов для модели будет иметь вид:

$$a_{11} = \frac{-m_z^{\omega} \cdot q \cdot S \cdot b}{J_z} \cdot \frac{b}{V} = \frac{1,205 \cdot 116437,5 \cdot 0,5 \cdot 0,8}{25} \cdot \frac{0,8}{750} = 2,4 \frac{1}{c}$$

$$a_{12} = \frac{-m_z^{\alpha} \cdot q \cdot S \cdot b}{J_z} \cdot \frac{b}{V} = \frac{0,305 \cdot 116437,5 \cdot 0,5 \cdot 0,8}{25} = 568,215 \frac{1}{c^2}$$

$$a_{13} = \frac{-m_z^{\delta} \cdot q \cdot S \cdot b}{J_z} \cdot \frac{b}{V} = \frac{0,225 \cdot 116437,5 \cdot 0,5 \cdot 0,8}{25} = 419,175 \frac{1}{c^2}$$

$$a_{42} = \frac{C_y^{\alpha} \cdot q \cdot S \cdot P}{m \cdot V} = \frac{1,63 \cdot 116437,5 \cdot 0,5 + 3300}{150 \cdot 750} = 0,873 \frac{1}{c}$$

$$a_{15} = \frac{1}{J_z} = \frac{1}{25} = 0,04 \frac{1}{кг \cdot м^2}$$

Коэффициенты для передаточной функции жесткого ЛА будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{aligned} K &= \frac{a_{13} \cdot a_{42}}{a_{11} \cdot a_{42} + a_{12}} = \frac{419.175 \cdot 0.873}{2.4 \cdot 0.873 + 568.215} = 0.642 \\ T_1 &= \frac{1}{a_{42}} = \frac{1}{0.873} = 1.145, c \\ T &= \frac{1}{\sqrt{a_{12} + a_{11} \cdot a_{42}}} = \frac{1}{\sqrt{568.215 + 2.4 \cdot 0.873}} = 0.042, c \\ \xi &= \frac{a_{11} + a_{42}}{2\sqrt{a_{12} + a_{11} \cdot a_{42}}} = \frac{2.4 + 0.873}{2\sqrt{568.215 + 2.4 \cdot 0.873}} = 0.069 \end{aligned} \right.$$

Таким образом, передаточные функции жесткого ЛА представляется в следующем виде:

$$W_{\delta_a}^{\dot{\delta}}(p) = \frac{0,642(1.145p + 1)}{0,001764p^2 + 0,005796p + 1};$$

Так же, как и для передаточной функции рулевого привода найдем её отображение в пространстве состояний для синтеза угла тангажа летательного аппарата с помощью метода технологии вложения систем (первый шаг) [4]:

Представим отношение $\frac{\dot{\delta}}{\delta_e}$

$$\text{в виде: } \frac{\dot{\delta}}{\delta_e} = \frac{\dot{\delta}}{z} \frac{z}{\delta_e} = W_1(p)W_2(p),$$

$$W_1(p) = \frac{\dot{\delta}}{z} = \frac{0,73509p + 0,642}{1},$$

$$W_2(p) = \frac{z}{\delta_a} = \frac{1}{0,001764p^2 + 0,005796p + 1}$$

Передаточная функция $W_1(p)$ соответствует дифференциальному уравнению

$$\dot{\delta}(t) = 0,73509 \frac{dz}{dt} + 0,642z$$

Передаточная функция $W_2(p)$ соответствует дифференциальному уравнению

$$\delta_e(t) = 0,001764 \cdot \frac{d^2z}{dt^2} + 0,005796 \cdot \frac{dz}{dt} + z$$

Вводя новые переменные состояния

$$x_1 = z, x_2 = \frac{dz}{dt}$$

И учитывая связь между ними $\frac{dx_1}{dt} = x_2$

получаем систему

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -\frac{1}{0,001764}x_1 - \frac{0,005796}{0,001764}x_2 + \frac{1}{0,001764}u \\ y &= 0,642x_1 + 0,73509x_2 \end{aligned} \right.$$

Которая записывается в форме модели в пространстве состояний с матрицами:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{0,001764} & -\frac{0,005796}{0,001764} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0,001764 \end{bmatrix}, C = [0,642 \quad 0,73509], D = 0$$

Далее рассмотрим цепь обратной связи структурной схемы системы стабилизации канала тангажа. Запись в пространстве состояний имеет вид:

$$X = \begin{bmatrix} U \\ x_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{0,00013156} & -\frac{0,01337}{0,00013156} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} K_{cz} \\ K_{dz} \\ 0,00013156 \end{bmatrix}, C = [0,046 \quad 0], D = 0$$

На рис. 2 и рис. 3 представлены структурная схема и схема контура демпфирования для системы стабилизации угла тангажа соответственно.

Примем допущение что Кдг нам известен и равен 1,76, и нужно произвести синтез системы стабилизации для Ксг при помощи метода технологии вложения систем (шаг 2 и 3) [4, 5]

Вторым и центральным этапом технологии вложения систем является построение и последующее использование так называемого тождества вложения,

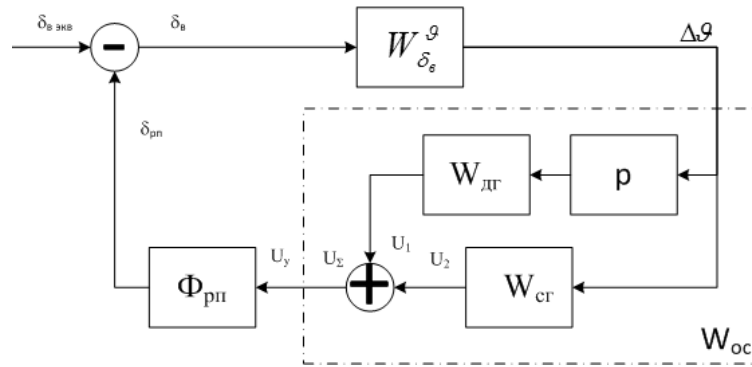


Рис. 2 Структурная схема ССт угла тангажа

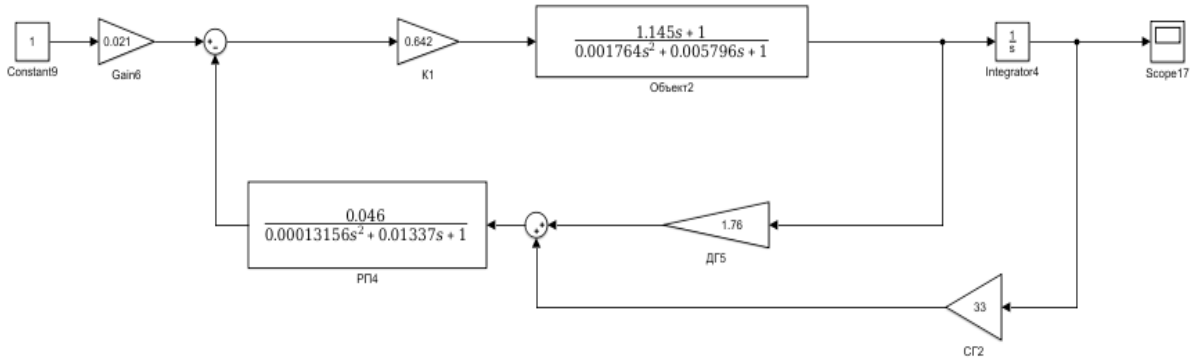


Рис. 3 Схема контура демфирования для ССт угла тангажа

которое формально связывает проматрицу $\Omega(p)$ исследуемой или синтезируемой системы, две матрицы вложения $\alpha(p)$ и $\beta(p)$, а также образ $\omega(p)$ этой системы.

Репроматрица $\Omega^{-1}(p)$ по определению представляет собой конструкцию, содержащую все возможные передаточные функции (скалярные и матричные) системы от начальных условий x_0 всех ее динамических подсистем и воздействий на динамические $u(p)$ и статические $y(p)$ подсистемы к выходам всех ее динамических $x(p)$ и статических $y(p)$ подсистем [15].

Введем две в общем случае полиномиальные матрицы:

$$\alpha(p) = [\alpha_{ij}(p)]_{(n+m+s) \times k}, \beta(p) = [\beta_{ij}(p)]_{q \times (n+m+s)}$$

у которых число строк первой и число столбцов второй соответствуют размеру репроматрицы. Число столбцов k матрицы $\alpha(p)$ и число строк q матрицы $\beta(p)$ могут принимать различные значения в зависимости от содержания решаемой задачи.

Композиция матриц $\beta(p)\Omega^{-1}(p)\alpha(p)$ имеет размер $q \times k$ и в зависимости от конкретного содержания решаемой задачи используется либо в скалярном ($q=k=1$).

На третьем этапе осуществляется переход от тождества вложения к расчетным формулам [15]. «Вычленение» блочного элемента размера $g \times s$, занимающего в репроматрице позицию, начиная с элемента строки $(l+1)$ и столбца $(g+1)$, можно осуществить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} 0_{r,e} & I_r & 0_{r,(n+m+s-r-e)} \end{bmatrix} \Omega^{-1}(p) \begin{bmatrix} 0_{g,s} \\ I_s \\ 0_{(n+m+l-g-s) \times s} \end{bmatrix} = \omega_{r,s}(p)$$

Итак, образ $\omega(p)$ некоторой системы формализует ту часть свойств (характеризаций) прототипа этой системы, которая по замыслу разработчика должна быть непременно перенесена на систему в целом.

Таким образом для нахождения коэффициента $K_{сг}$ выберем образ $\omega(p)$, а именно выхода желаемого сиг-

$$[0,046 \ 0] \begin{bmatrix} \frac{0,00013156p+0,01337}{0,00013156p^2+0,01337p+1} & \frac{0,00013156}{0,00013156p^2+0,01337p+1} \\ 1 & 0,00013156p \\ -\frac{0,00013156p^2+0,01337p+1}{0,00013156p^2+0,01337p+1} & \frac{0,00013156p}{0,00013156p^2+0,01337p+1} \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} K_{cz} \\ 1,76 \\ 0,00013156 \end{bmatrix} + [0] = F_y^u(p)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{0,00000605176p+0,00061502}{0,00013156p^2+0,01337p+1} & \frac{0,00000605176}{0,00013156p^2+0,01337p+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{cz} \\ 1,76 \\ 0,00013156 \end{bmatrix} = F_y^u(p)$$

$$\frac{0,00013156K_{cz}(0,00000605176p+0,00061502)+0,00001065}{0,00013156(0,00013156p^2+0,01337p+1)} = F$$

Формула 1

$$\begin{aligned} & \frac{0,00013156K_{cz}(0,00000605176p+0,00061502)+0,00001065}{0,00013156(0,00013156p^2+0,01337p+1)} = \\ & = 0,10125 \frac{(0,0019723p+1)}{(0,00013156p^2+0,01337p+1)} \end{aligned}$$

Формула 2

$$X = \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \dot{v} \\ U \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{0,001764} & -\frac{0,005796}{0,001764} & 1 \\ 0 & -\frac{1}{0,00013156} & -\frac{0,01337}{0,00013156} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 33 \\ \frac{1,76}{0,00013156} \end{bmatrix},$$

$$C = [0,642 \ 0,73509 \ 0,046], D = [0]$$

Формула 3

нала с блока Ксг на вход рулевой машинки и с помощью метода определить подходящий коэффициент Ксг.

$$X = \begin{bmatrix} U \\ x_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{0,00013156} & -\frac{0,01337}{0,00013156} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} K_{сг} \\ 1,76 \\ 0,00013156 \end{bmatrix}, C = [0,046 \ 0], D = 0$$

Репроматрица рассчитываем по формуле [4]:

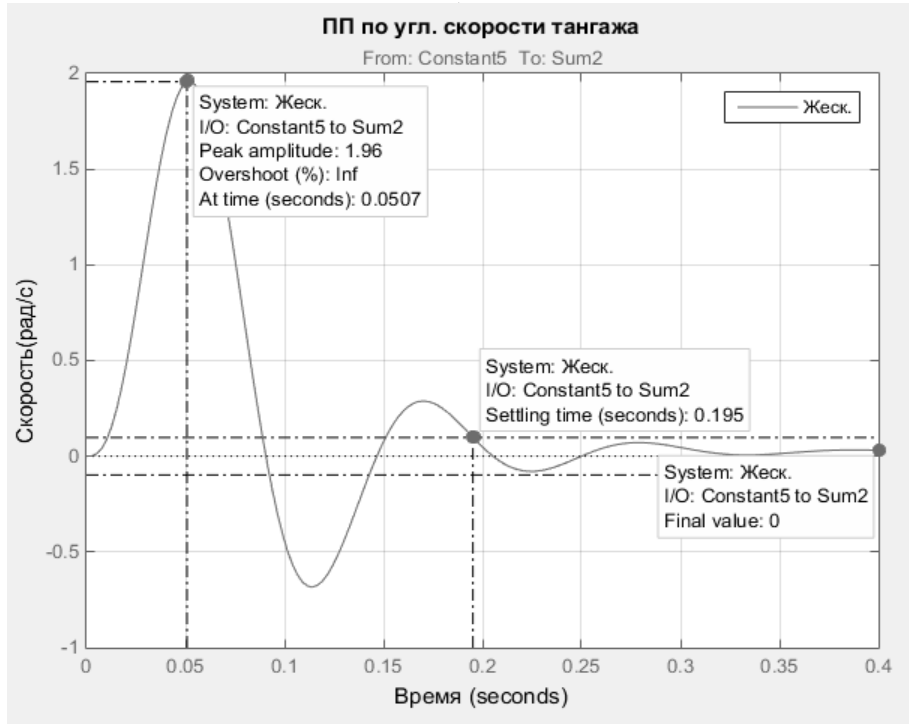


Рис. 4. ПП ССт по угловой скорости тангажа

$$\Omega^{-1}(p) = \begin{bmatrix} (pI_n - A)^{-1} & 0 & (pI_n - A)^{-1}B \\ C(pI_n - A)^{-1} & I_m & C(pI_n - A)^{-1}B + D \\ 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}$$

Соответствующий выбор элементов $\alpha_{ij}(p)$ и $\beta_{ij}(p)$ матриц вложения позволяет получать различные «конструкции» из передаточных функций системы.

Соответственно матрица элементов рассчитывается из необходимого коэффициента для синтеза системы и нахождения $K_{сг}$. Соответственно элементы матриц имеют вид:

$$\alpha_{ij} = [0 \quad I_m \quad 0]; \beta = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_s \end{bmatrix}$$

По формуле «вычленения» блочного элемента получим коэффициент $K_{сг}$ для желаемого образа $\omega(p)$

$$[0 \quad I_m \quad 0] \begin{bmatrix} (pI_n - A)^{-1} & 0 & (pI_n - A)^{-1}B \\ C(pI_n - A)^{-1} & I_m & C(pI_n - A)^{-1}B + D \\ 0 & 0 & I_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_s \end{bmatrix} =$$

$$= C(pI_n - A)^{-1}B + D = F_y^u(p) \equiv \omega(p)$$

Отсюда раскроем выражение $C(pI_n - A)^{-1}B + D = F_y^u(p)$, подставив в него матрицы для цепи обратной связи в форме пространства состояний и получим: см. формула 1.

Желаемый образ $\omega(p)$ выбираем из принципов эффективности и времени переходного процесса [16]. Отсюда найдем коэффициент $K_{сг}$ (формула 2).

Приведя все подобные слагаемые получаем $K_{сг} = 33$

Теперь проведем анализ всей системы стабилизации для угла тангажа. Для этого запишем систему стабилизации в пространстве состояний с полученным $K_{сг}$ (формула 3).

Переходные процессы для ЛА ССт и для выбранного $K_{сг}$

- Ошибка по угловой скорости тангажа 0 град/с
- Время переходного процесса 0,195с
- Ошибка по углу тангажа 0.64170

Вывод

Технология вложения систем в настоящее время является одним из самых молодых направлений в тео-

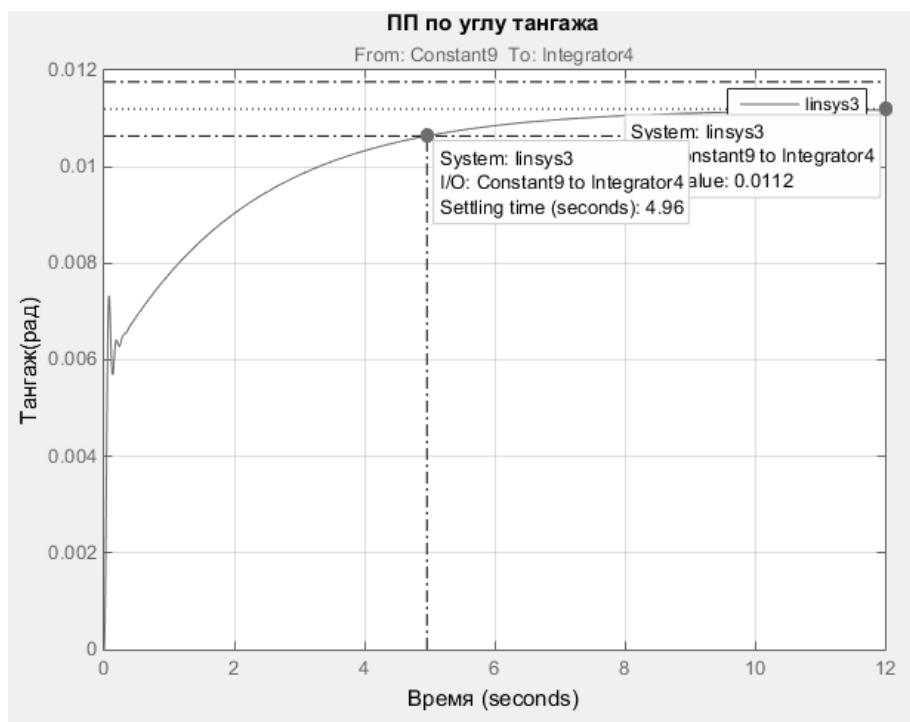


Рис. 5. ПП по углу тангажа

рии систем. Ее аппарат позволяет эффективно решать практически все классические задачи. Отличительной чертой технологии вложения систем, используемой в совокупности с методом канонизации матриц, является возможность найти строгие математические условия разрешимости исследуемых задач анализа и особенно синтеза и возможность определения не просто какого-либо аналитического решения, а всего класса эквивалентных решений задачи. Этой чертой не обладает практически ни один из ранее существовавших методов решения задач анализа и синтеза систем управления.

Произведен синтез угла тангажа при помощи технологии вложения систем. Как видно из графиков полученные результаты можно применить в дальнейших работах уже для связанных систем по трем координатам тангажа, рысканья и крена.

Предлагаемый в данной статье метод синтеза системы стабилизации летательного аппарата (ракеты) ожидаемо улучшит характеристики не только для одного канала, но также и для связанных каналов управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории автоматического управления техническими системами. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993.
2. Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга.: Издательство Н.Ф. Бочкаревой 2006.
3. Буков В.Н., Рябченко В.Н. Вложение систем. Синтез регуляторов // Автоматика и телемеханика. 2000. № 7. С. 3–14.
4. Асанов А.З. Технология вложения систем и ее приложения. — Уфа: Уфимский гос. авиационный технический ун-т, 2009.
5. https://www.researchgate.net/publication/273044148_Cto_takoe_i_dla_cego_tehnologia_vlozenia_sistem (Дата обращения: 15.09.2022)
6. Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования/П.П. Афанасьев, И.С. Голубев, С.Б. Левочкин, В.Н. Новиков, С.Г. Парфесь, М.Д. Пестов, И.К. Туркин. Под ред. И.С. Голубева и И.К. Туркина. -М.: МАИ, 2010. —654 с.
7. Сунгуров А.С., Гарманов С.С. Обзор беспилотных летательных аппаратов // Современные научные исследования и инновации. 2017. № 5. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2017/05/83081>.
8. Сунгуров А.С., Гарманов С.С. Обзор беспилотных летательных аппаратов // Современные научные исследования и инновации. 2017. № 5. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2017/05/83081>.
9. Бронников А.М. Методика синтеза адаптивного закона управления системы улучшения устойчивости и управляемости самолета // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 3 (116).

10. Буков В.Н. 1-я Российская мультikonференция по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление // ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург, Россия. 2006.
11. Сыров А.С., Пучков А.М., Рутковский В.Ю., Глумов В.М. Задачи управления движением многорежимных беспилотных летательных аппаратов // Проблемы управления. 2014. № 4.
12. А.А. Лебедев, В.А. Карабанов. Динамика систем управления беспилотными летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1965.
13. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории автоматического управления техническими системами. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993.
14. В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. Теория систем автоматического управления. — М.: Наука, 1966.
15. Гончаров К.Н. Анализ технологии вложения систем как метода исследования систем стабилизации летательного аппарата // Ракетные комплексы и ракетно-космические системы. Проектирование, экспериментальная отработка, летные испытания, эксплуатация: Труды секции 22 имени академика В.Н. Челомея XLV Академических чтений по космонавтике. Вып. 9/ Составитель: к.ф.-м.н. Л.С. Точилов. Под общей ред. Д.т.н., проф. А.Г. Леонова — Реутов, АО «ВПК «НПО машиностроения», 2021. — 492 с.: ил.
16. Сельвесюк Н.И. Численный алгоритм синтеза регуляторов заданной точности по выходу для многосвязных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 12.

© Гончаров Кирилл Николаевич (K.n.goncharov@vpk.npomash.ru), Лукьянов Сергей Львович (nio406@vpk.npomash.ru),
Кулаков Дмитрий Николаевич (nio406@vpk.npomash.ru), Туманян Оганес Каренович (nio406@vpk.npomash.ru).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»