

**Пьявченко Олег Николаевич**

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

E-mail: kafmps@ttpark.ru.

347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81.

Тел.: 88634328052.

**Pyavchenko Oleg Nikolaevich**

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

E-mail: kafmps@ttpark.ru.

81, Petrovskay street, Taganrog, 347900, Russia.

Phone: +78634328052.

УДК 681.51

**А.А. Колесников, В.А. Кобзев, Ф. Нгуен**

**СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ  
САМОЛЕТОВ-АМФИБИЙ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ  
В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

*В докладе рассматривается синергетический подход к решению актуальной научно-технической проблемы управления движением современных самолетов-амфибий, функционирующих в условиях экстремального воздействия внешней среды.*

*Инварианты; законы управления; наилучшие возмущения; синтез; динамическая декомпозиция.*

**A.A. Kolesnikov, V.A. Kobzev, Phuong Nguen**

**SYNERGETICS SYNTHESIS OF AMPHIBIAN AIRCRAFT MOTION  
CONTROL SYSTEM OPERATED UNDER EXTREME CONDITIONS**

*We explore synergetics approach to solve actual R&D problem of modern amphibian aircraft motion control operated under environment extreme actions.*

*Invariants, control laws; worst disturbances; design; dynamics decomposition.*

Задача синтеза системы управления продольным движением самолета-амфибии (СА) состоит в определении вектора управления  $u(x)$  как функции координат состояния системы, обеспечивающего полет СА с заданной скоростью  $V_0$ , высотой  $H_0$  и углом тангажа  $\vartheta_0$ . Таким образом, необходимо ввести следующие желаемые технологические инварианты системы [1]:

$$V_x = V_0; y = H_0; \vartheta = \vartheta_0. \quad (1)$$

Тогда в соответствии с методом АКАР – аналитического конструирования агрегированных регуляторов [2, 3] поставим следующую задачу синергетического синтеза: требуется найти закон векторного управления, способный обеспечить инварианты (1) и парировать неизвестные внешние возмущения. Для решения этой задачи построим следующую расширенную модель синтеза системы:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -g \sin x_5 + a_1 u_1 + z_1; \\ \dot{x}_2(t) = -g \cos x_5 + a_2 u_2 + z_2; \\ \dot{x}_3(t) = a_3 u_3 + z_3; \\ \dot{x}_4(t) = x_1 \sin x_5 + x_2 \cos x_5; \\ \dot{x}_5(t) = x_3; \\ \dot{x}_6(t) = x_1 \cos x_5 - x_2 \sin x_5; \\ \dot{z}_1(t) = \eta_1(x_1 - V_0); \\ \dot{z}_2(t) = \eta_2(x_4 - H_0); \\ \dot{z}_3(t) = \eta_3(x_5 - \vartheta_0), \end{cases} \quad (2)$$

где  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  – постоянные коэффициенты,  $z_1, z_2, z_3$  – оценки возмущающих воздействий. В отношении определения оценок  $\hat{z}(t)$  внешних возмущающих воздействий  $M(t) \leq M_{max}$ , вводимых в расширенную модель синергетического синтеза (2), необходимо подчеркнуть, что указанные возмущения полагаются наихудшими. Совершенно очевидно, что в основу принципа выделения такого класса возмущений целесообразно положить следующее утверждение: «*наихудшие возмущения, действующие на объект управления – это такие внешние  $M(t)$  возмущающие воздействия, которые за минимально-возможное время выбрасывают объект на максимально-возможное расстояние от желаемого состояния в его пространстве состояний*». По существу, это базовое положение теории оптимального по быстродействию управления, но *наоборот!* Согласно этой теории, оптимальные по быстродействию управления имеют в большинстве случаев *кусочно-постоянный* характер. Тогда наихудшие внешние возмущения – это возмущения вида

$$M_i(t)_{sup} = M_{i max} \operatorname{sign} \mu_i(t), \quad M_{max} = \operatorname{const},$$

со случайным изменением параметра  $M_{i max}$  и знака функции  $\mu_i(t)$ . Из теории управления известно, что для компенсации кусочно-постоянных возмущений в законы управления следует включить *интегральные составляющие*, что и осуществлено в расширенной модели синтеза (2). Три последних уравнения в системе (2) являются динамической моделью возмущающих воздействий. При ее составлении учитывается требование выполнения технологических инвариантов (1).

Процедура синергетического синтеза астатического автопилота. Согласно методу АКАР [2,3], выберем с учетом инвариантов (1) следующую совокупность макропеременных:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= x_1 - V_0 + \mu_1 z_1; \\ \psi_2 &= x_2 - \varphi_1(x_4, x_5, z_1, z_2, z_3); \\ \psi_3 &= x_3 - \varphi_2(x_4, x_5, z_1, z_2, z_3). \end{aligned} \quad (3)$$

Выражения (3) должны удовлетворять решению функциональных уравнений:

$$T_i \dot{\psi}_i(t) + \psi_i = 0, \quad i = 1 \dots 3. \quad (4)$$

На инвариантном многообразии  $\psi_1 = 0$  выполняется соотношение  $x_1 - V_0 = -\mu_1 z_1$ . Тогда седьмое уравнение системы (2) будет иметь вид

$\dot{z}_1 = -\eta_1 \mu_1 z_1$  и обладать свойством устойчивости при  $\eta_1 \mu_1 > 0$ , т.е. в установившемся режиме достигается технологический инвариант  $x_1 = V_0$ . Тогда функции  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  будут соответственно определять характер изменения вертикальной скорости и продольной угловой скорости движения. При этом горизонтальная скорость стремится к заданному значению  $V_0$  на пересечении ИМ  $\psi_1 = 0$ ,  $\psi_2 = 0$  и  $\psi_3 = 0$ , т.е. наблюдается эффект динамической декомпозиции исходной системы, которая будет описываться следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_4(t) = (V_0 - \mu_1 z_1) \sin x_5 + \varphi_1 \cos x_5; \\ \dot{x}_5(t) = \varphi_2; \\ \dot{x}_6(t) = (V_0 - \mu_1 z_1) \cos x_5 - \varphi_1 \sin x_5; \\ \dot{z}_1(t) = \eta_1 (x_1 - V_0); \\ \dot{z}_2(t) = \eta_2 (x_4 - H_0); \\ \dot{z}_3(t) = \eta_3 (x_5 - \vartheta_0). \end{cases} \quad (5)$$

Теперь для декомпозированной системы (5) зададим вторую совокупность макропеременных:

$$\psi_4 = x_4 - H_0 + \mu_2 z_2 = 0; \quad \psi_5 = x_5 - \vartheta_0 + \mu_3 z_3 = 0, \quad (6)$$

удовлетворяющую решениям системы функциональных уравнений

$$T_i \dot{\psi}_i(t) + \psi_i = 0, \quad i = 4, 5. \quad (7)$$

На  $\psi_4 = 0$  и  $\psi_5 = 0$  два последних уравнения системы (5) принимают вид:

$$\dot{z}_2(t) = -\eta_2 \mu_2 z_2; \quad \dot{z}_3(t) = -\eta_3 \mu_3 z_3$$

и обладают свойством устойчивости при условиях  $\eta_2 \mu_2 > 0$  и  $\eta_3 \mu_3 > 0$ . Это означает, что в установившемся режиме достигаются технологические инварианты  $x_4 = H_0$  и  $x_5 = \vartheta_0$ . Совместно решение системы уравнений (5)-(7) позволяет найти «внутренние» управления  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ :

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= -\frac{1}{T_4 \cos x_5} \left( T_4 V_0 \sin x_5 - T_4 \mu_1 z_1 \sin(x_5) + \right. \\ &\quad \left. + T_4 \mu_2 \eta_2 (x_4 - H_0) + x_4 - H_0 + \mu_2 z_2 \right); \\ \varphi_2 &= \mu_3 \eta_3 x_5 + \mu_3 \eta_3 \vartheta_0 - \frac{x_5 - \vartheta_0 + \mu_3 z_3}{T_5}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$  – внутренние переменные регулятора, вычисляемые как интегралы отклонения линейной скорости, высоты полета и угла тангажа от своих желаемых значений:

$$z_1 = \eta_1 \int (x_1 - V_0) dt, \quad z_2 = \eta_2 \int (x_4 - H_0) dt, \quad z_3 = \eta_3 \int (x_5 - \vartheta_0) dt.$$

Поставляя (3) в (4) с учетом системы (2) и выражения (8) находим выражения для векторного управления  $u$ :

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{1}{a_1} \left( -g \sin x_5 + z_1 + \mu_1 \eta_1 (x_1 - V_0) + \frac{x_1 - V_0 + \mu_1 z_1}{T_1} \right); \\
 u_2 &= ABx_1 + Cx_2 + Dx_3 + AE x_4 + \frac{\mu_1 \sin x_5}{a_2 T_2 \cos x_5} z_1 - \\
 &\quad - Az_2 (\mu_2 + T_2 T_4 \cos x_5) + AF; \\
 u_3 &= -\frac{1}{T_3 T_5 a_3} [(T_3 T_5 \mu_3 \eta_3 + T_5 + T_3) x_3 + (\mu_3 \eta_3 (T_4 + T_5) + 1) x_5 + \\
 &\quad + (T_3 T_5 c_3 + \mu_3) z_3] + \frac{\vartheta_0 - \mu_3 \eta_3 \vartheta_0 (T_3 + T_5)}{T_3 T_5 a_3},
 \end{aligned} \tag{9}$$

где обозначено:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{a_2 T_2 T_4 \cos x_5}; \quad B = T_2 [T_4 (\mu_1 \eta_1 + \mu_2 \eta_2) - 1] \sin x_5; \quad C = \frac{\mu_2 \eta_2}{a_2} - \frac{1}{a_2 T_4} - \frac{1}{a_2 T_2}; \\
 E &= -1 - (T_4 + T_2) \mu_2 \eta_2; \\
 D &= \frac{\mu_1 z_1}{a_2 \cos^2 x_5} - \frac{[\mu_2 z_2 + (1 + T_4 \mu_2 \eta_2)(x_4 + H_0)] \sin x_5 - T_4 V_0}{a_2 T_4 \cos^2 x_5}; \\
 F &= -T_2 T_4 (\mu_1 \eta_1 V_0 \sin x_5 - g \cos^2 x_5) - T_4 V_0 \sin x_5 + H_0 [1 + (T_2 + T_4) \mu_2 \eta_2].
 \end{aligned}$$

**Результаты компьютерного моделирования.** На рис. 1-5 приведены результаты моделирования замкнутой системы (2) с синтезированными законами управления (9) при кусочно-постоянном и гармоническом возмущениях, при этом  $\eta_i = [-10^{-3} \quad 10^{-6} \quad -0.01]^T$ ;  $\mu_i = [-10^2 \quad 10^3 \quad -10^2]^T$ ; высота волны 2 м; период волнения 10 с; высота полета 2 500 м; желаемая горизонтальная скорость 83 м/с. Результаты моделирования подтверждают эффективность синергетического подхода к решению сложной проблемы управления движением СА в условиях экстремального воздействия внешней среды.

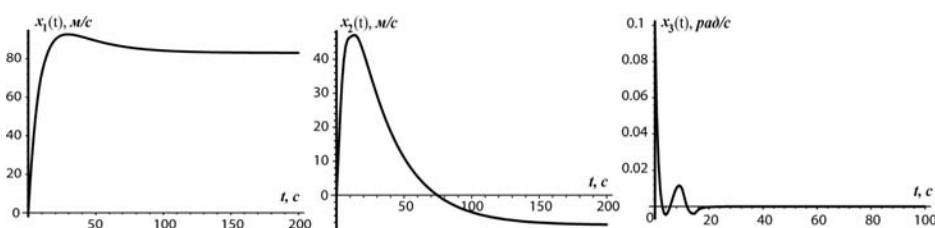


Рис. 1. Переходные процессы относительно скоростей  $V_x$ ,  $V_y$  и угловой скорости  $\omega_z$

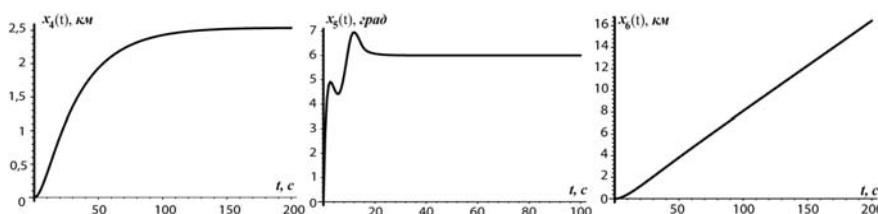


Рис. 2. Переходные процессы относительно высоты, угла тангажа и дальности полета

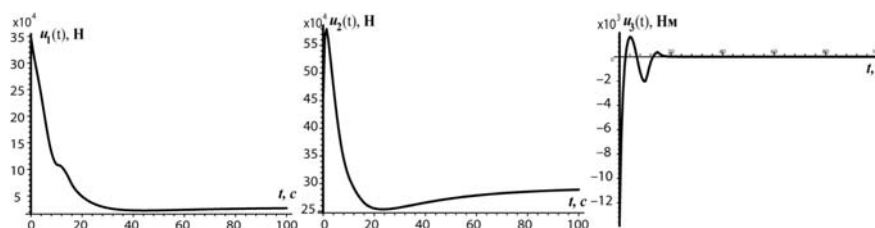


Рис. 3. Переходные процессы относительно управляющих воздействий

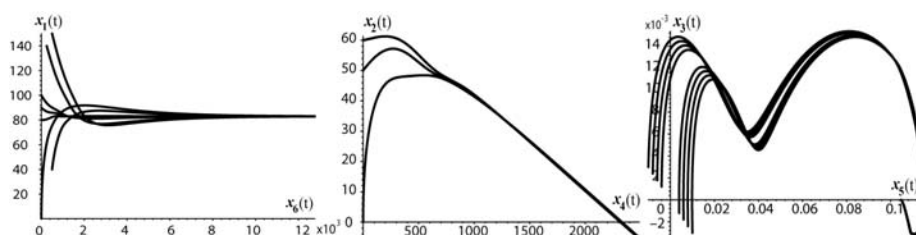


Рис. 4. Проекция фазовых траекторий системы

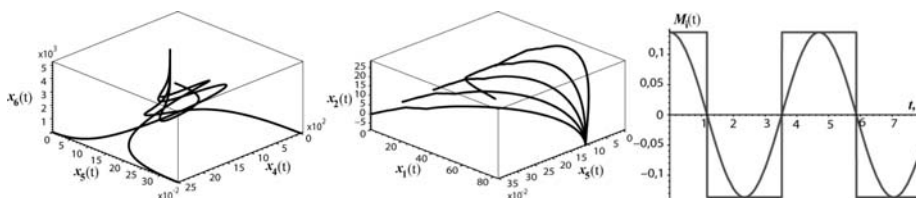


Рис. 5. Фазовые портреты и графики возмущения

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников А.А., Кобзев В.А. Динамика полета и управление: синергетический подход. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 198 с.
2. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
3. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – М.: УРСС/КомКнига, 2006. – 240 с.

**Колесников Анатолий Аркадьевич**

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

E-mail: anatoly.kolesnikov@gmail.com.

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

Тел.: 88634360707.

**Нгуен Фуонг**

E-mail: nguyenvhuong@sovicoholdings.com.

**Кобзев Виктор Анатольевич**

ОАО «Таганрогский авиационный научно-технический комплекс им. Г.М. Бериева».

E-mail: victor@beriev.com.

347923, г. Таганрог, пл. Авиаторов, 1.

Тел.: 88634390901; 88634390839.

**Kolesnikov Anatoliy Arkad'evich**

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

E-mail: anatoly.kolesnikov@gmail.com.  
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.  
Phone: +78634360707.

**Nguen Fuong**  
E-mail: nguyenphuong@sovicoholdings.com.

**Kobzev Viktor Anatol'evich**  
Beriev Aircraft Company.  
E-mail: victor@beriev.com.  
1, Aviatorov area, Taganrog, 347923, Russia.  
Phone: +78634390901; +78634390839.

УДК 681.03.24

**В.В. Тютиков, А.И. Воронин**

### **ПОДЧИНЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МЕТОДА АКАР**

*На основе использования метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов предложен подход к синтезу систем управления электромеханическими системами, позволяющий осуществлять ограничение значений координат и отдельную настройку контуров управления.*

*Подчиненное регулирование; электромеханическая система; ограничение координат; аналитическое конструирование агрегированных регуляторов.*

**V.V. Tyutikov, A.I. Voronin**

### **THE SUBORDINATED REGULATION OF COORDINATES OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS ON THE BASIS OF METHOD AKAR**

*On the basis of use of a method of analytical designing the aggregated regulators the approach to synthesis of control systems by the electromechanical systems is offered, allowing to carry out restriction of values of coordinates and separate adjustment of contours of management.*

*The subordinated regulation; electromechanical system; restriction of coordinates; analytical designing of the aggregated regulators.*

Подчиненное регулирование координат давно и прочно вошло в теорию и практику автоматического управления электроприводами как постоянного, так и переменного тока, и является наиболее востребованным видом управления [1].

Его основными преимуществами являются простота синтеза регуляторов (П- или ПИ-типа) и настройки локальных контуров управления на объекте, удобство ограничения координат состояния, а также достаточно высокие показатели качества управления применительно к одномассовым электромеханическим системам.

Структура типовой системы подчиненного регулирования частоты вращения электродвигателя приведена на рис. 1, где  $L$  – индуктивность (Гн) и  $R$  – активное сопротивление (Ом) якорной цепи;  $C$  – конструктивная постоянная электродвигателя, Вб;  $J$  – суммарный момент инерции механической части электропривода, кг·м<sup>2</sup>;  $K_{СП}$  – коэффициент усиления силового преобразователя;  $M_C(t)$  – момент нагрузки, Н·м;  $I(t)$  – ток цепи якоря, А;  $\Omega_3(t)$  и  $\Omega(t)$  – заданная и действительная частоты вращения ротора, рад/с<sup>-1</sup>; РТ и РС – регуляторы тока и скорости (частоты вращения) ротора.