

**О.Ю. Воронков****СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
«ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМОЙ»**

*Работа посвящена синтезу системы управления летательным аппаратом с применением синергетической теории управления. Статья содержит общее описание аппарата и его системы управления, синтез законов управления и компьютерное моделирование нелинейной динамики аппарата. Раскрыт смысл понятия функциональной декомпозиции процессов управления и приведена блок-схема иерархической системы управления, которая может быть сконструирована с применением функциональной декомпозиции. Описаны три уровня иерархии, из которых состоит иерархическая система управления: верхний уровень, средний уровень и нижний уровень. На верхнем уровне иерархии содержится математическая модель «летающей платформы» в требуемом режиме работы и на базе этой математической модели синтезируются общие синергетические законы управления. На среднем уровне иерархии содержатся уравнения связи между верхним и нижним уровнями иерархии; эти уравнения связи основаны на компоновочной схеме «летающей платформы» и на расчёте аэродинамических параметров вентиляторов. На нижнем уровне иерархии содержится математическая модель системы синхронизации двигателей «летающей платформы» и на основе этой математической модели синтезируются частные синергетические законы управления. Особое внимание уделено вопросу формирования энергетического инварианта, решающего задачу поддержания оптимального потокосцепления ротора в целях энергосберегающего управления силовыми установками, получающими энергию от автономного источника ограниченной мощности, в роли которого выступает турбогенераторная установка. Энергосберегающее управление позволяет эффективно использовать потенциал турбогенераторов и электродвигателей, чем обеспечиваются высокий коэффициент полезного действия аппарата и безопасность полёта. Актуальность работы состоит в необходимости создания вертикально взлетающего аппарата типа «летающая платформа» в целях повышения эффективности операций по спасению людей из зон бедствий, где вертолёты и иные современные средства не справляются с задачами. Научная новизна работы заключена в применении синергетических подходов к разработке иерархической системы балансировки пространственного положения аппарата и к координирующему энергосберегающему управлению электродвигателями, получающими энергию от турбогенераторной установки.*

*«Летающая платформа»; вентилятор в кольце; синергетическая теория управления; функциональная декомпозиция; энергосберегающее управление.*

**O.Yu. Voronkov****SYNERGETIC APPROACH TO THE “FLYING PLATFORM” CONTROL  
SYSTEM SYNTHESIS**

*The work is devoted to the synthesis of the aircraft control system using synergetic control theory. The paper contains the vehicle & its control system general description, the control laws synthesis & the computer simulation of the vehicle nonlinear dynamics. The meaning of the management processes functional decomposition is revealed & a block diagram of a hierarchical control system that can be constructed using functional decomposition is given. Three hierarchy levels used in the hierarchical control system are described: the upper level, the middle level & the lower level. The upper hierarchy level contains a mathematical model of the “flying platform” in the required operation mode & general synergetic control laws based on this mathematical model. The middle hierarchy level contains connection equations between the upper & the lower hierarchy levels; these connection equations are based on the “flying platform” layout & on the fans aerodynamic design. The lower hierarchy level contains a mathematical model of the “flying platform” engines synchronization system & particular synergetic control laws based on this mathematical model. Particular attention is paid to the issue of energy invariant formation, which solves the problem of maintaining optimal rotor flux linkage in order to use energy-saving control of power plants that receive energy from*

*an autonomous source of limited power, which is a turbine generator unit. Energy-saving control allows to use the potential of turbine generators and electric motors effectively, that ensures a high device efficiency and flight safety. The relevance of the work consists in the necessity of "flying platform" type vertical take-off & landing aircraft creation to increase the effectiveness of people rescue operations in those disaster areas where helicopters & other modern means don't cope with a task. The scientific novelty of the work consists in synergetic approach application to the design of the vehicle's spatial position hierarchic system & to the coordinating energy-save control over the electric engines that get energy from the turbine generator unit.*

*"Flying platform"; fan in the ring; synergetic control theory; functional decomposition; energy-save control*

**Введение.** В последнее время перед конструкторами транспорта, в частности, летательных аппаратов, стоит задача синтеза автопилотов [1–7] для различных режимов работы машин. Автопилоты представляют собой векторные регуляторы, предназначенные для многоканального автоматического управления движущимся аппаратом без участия человека. Особенно сложными представляются случаи, когда в роли объекта управления выступает аппарат нетрадиционной компоновки. Так, в авиационной сфере идёт интенсивное освоение новых аэродинамических схем, имеющих нестандартное расположение аэродинамических поверхностей или их полное отсутствие, нестандартное расположение движителей и их новые типы. Существующие наработки по аппаратам классических компоновок малоприспособлены для анализа динамики новых типов аппаратов, формирования их математических моделей и синтеза управляющих алгоритмов. Поэтому требуется создание новых математических моделей таких объектов и законов управления ими с учётом всех нелинейностей их динамики.

**Описание «летающей платформы» и её системы управления.** Предлагаемый летательный аппарат [8–10] относится к типу «летающая платформа». Этот тип представляет собой вертикально взлетающий аппарат [11], использующий для создания подъёмной силы вентиляторы малого диаметра, как правило, расположенные в аэродинамических кольцах. Аэродинамические кольца предназначены для создания дополнительной тяги и для защиты вентиляторов от столкновения с посторонними предметами [12].

Предлагаемая «летающая платформа» содержит фюзеляж в виде аэродинамического крыла малого удлинения, обеспечивающего небольшую подъёмную силу на высоких скоростях (до 150 км/ч) в дополнение к основной тяге вентиляторов. Внутри фюзеляжа расположено четыре электрических двигателя с вентиляторами (два передних и два задних), получающих энергию от турбогенераторной установки. Продольное управление аппаратом осуществляется путём дифференциального изменения тяги пары передних и пары задних вентиляторов, а поперечное управление аппаратом осуществляется путём дифференциального изменения тяги пары правых и пары левых вентиляторов.

Непременным условием устойчивости аппарата, диктуемым аэродинамической схемой и диапазоном скоростей, является пространственное положение, близкое к горизонтальному. Аппарат управляется как органами ручного управления на рабочем месте экипажа (путевое управление), так и системой автоматического управления (балансировка пространственного положения). Система автоматического управления основана на принципах синергетической теории, развиваемой на Кафедре синергетики и процессов управления Южного федерального университета под руководством проф. А.А. Колесникова [13–16]. Эта система также решает задачу координирующего энергосберегающего управления силовыми установками, питающимися от источника электроэнергии ограниченной мощности [17, 18].

При синтезе регуляторов для сложных технических объектов широко применяется функциональная декомпозиция процессов управления. Функциональная декомпозиция является разбиением общей цели управления на ряд частных задач, расположенных на разных уровнях иерархии. В результате формируется иерархическая система управления, показанная на рис. 1 в виде блок-схемы.



Рис. 1. Блок-схема иерархической системы управления предлагаемой «летающей платформой»

На верхнем уровне иерархии формируются общие стратегии управления. Они используются на среднем уровне иерархии для выработки целей управления нижнего уровня с использованием уравнений связи. На нижнем уровне иерархии синтезируются частные управляющие воздействия [19].

**Алгоритмы управления верхнего уровня иерархии.** Математическая модель «летающей платформы» в режиме вертикального движения показана ниже:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= \frac{u_1 - mg - C_1 x_1^2}{m}, \\
 \dot{x}_2 &= \frac{u_2 - C_2 x_2^2}{I_x}, \\
 \dot{x}_3 &= \frac{u_3 - C_3 x_3^2}{I_z}, \\
 \dot{x}_4 &= x_1, \\
 \dot{x}_5 &= x_2, \\
 \dot{x}_6 &= x_3.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь  $x_1 = V_y$  – вертикальная скорость,  $x_2 = \omega_x$  – угловая скорость относительно продольной оси,  $x_3 = \omega_z$  – угловая скорость относительно поперечной оси,  $x_4 = Y$  – высота,  $x_5 = \vartheta$  – угол тангажа,  $x_6 = \gamma$  – угол крена,  $u_1 = F_y$  – равнодействующая сил двигателей по вертикальной оси,  $u_2 = M_x$  – равнодействующая моментов двигателей по продольной оси,  $u_3 = M_z$  – равнодействующая моментов

двигателей по боковой оси,  $m$  – масса аппарата,  $I_x$ ,  $I_z$  – моменты инерции относительно продольной и поперечной осей,  $g$  – ускорение свободного падения,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , – аэродинамические коэффициенты сопротивления [11].

Технологическими инвариантами (целями управления) являются стабилизации высоты  $x_4 = x_4^*$ , угла тангажа  $x_5 = x_5^*$ , угла крена  $x_6 = x_6^*$ . В соответствии с правилами метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), являющегося основным методом синергетической теории управления [13], синтезируются алгоритмы управления верхнего уровня:

$$\begin{aligned} u_1 &= -m \left( \frac{\Psi_1}{T_1} + \frac{\dot{\Psi}_4}{T_4} \right) + mg + C_1 x_1^2, \\ u_2 &= -I_x \left( \frac{\Psi_2}{T_2} + \frac{\dot{\Psi}_5}{T_5} \right) + C_2 x_2^2, \\ u_3 &= -I_z \left( \frac{\Psi_3}{T_3} + \frac{\dot{\Psi}_6}{T_6} \right) + C_3 x_3^2. \end{aligned} \quad (2)$$

В этих формулах:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= x_1 - \varphi_1, \quad \Psi_2 = x_2 - \varphi_2, \quad \Psi_3 = x_3 - \varphi_3; \\ \dot{\Psi}_4 &= \dot{x}_4 = \varphi_1, \quad \dot{\Psi}_5 = \dot{x}_5 = \varphi_2, \quad \dot{\Psi}_6 = \dot{x}_6 = \varphi_3; \\ \varphi_1 &= -\frac{\Psi_4}{T_4}, \quad \varphi_2 = -\frac{\Psi_5}{T_5}, \quad \varphi_3 = -\frac{\Psi_6}{T_6}; \\ \Psi_4 &= x_4 - x_4^* = 0, \quad \Psi_5 = x_5 - x_5^* = 0, \quad \Psi_6 = x_6 - x_6^* = 0. \end{aligned}$$

Здесь  $\Psi_i$ ,  $i = \overline{1, 6}$  – агрегированные макропеременные.

**Уравнения связи среднего уровня иерархии.** Уравнения связи среднего уровня формируются с учётом компоновочной схемы «летающей платформы» и аэродинамических параметров её вентиляторных установок. Уравнения показаны ниже:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{8}{D_f^2} \sqrt{\frac{\bar{T}_f \left( u_1 + \frac{u_2}{l_x} + \frac{u_3}{l_z} \right)}{\frac{\chi_e}{3} \sigma_7 c_{y0} \pi}}, & \omega_2 &= \frac{8}{D_f^2} \sqrt{\frac{\bar{T}_f \left( u_1 - \frac{u_2}{l_x} + \frac{u_3}{l_z} \right)}{\frac{\chi_e}{3} \sigma_7 c_{y0} \pi}}, \\ \omega_3 &= \frac{8}{D_f^2} \sqrt{\frac{\bar{T}_f \left( u_1 + \frac{u_2}{l_x} - \frac{u_3}{l_z} \right)}{\frac{\chi_e}{3} \sigma_7 c_{y0} \pi}}, & \omega_4 &= \frac{8}{D_f^2} \sqrt{\frac{\bar{T}_f \left( u_1 - \frac{u_2}{l_x} - \frac{u_3}{l_z} \right)}{\frac{\chi_e}{3} \sigma_7 c_{y0} \pi}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $D_f = 1$  м – диаметр вентилятора,  $\bar{T}_f = 0,7$  – относительная тяга вентилятора,  $\chi_e = 0,96$  – коэффициент концевых потерь,  $\sigma_7 = 0,318$  – коэффициент заполнения вентилятора,  $c_{y0} = 0,7$  – аэродинамический коэффициент [12].

**Алгоритмы управления нижнего уровня иерархии.** Система синхронизации силовых установок «летающей платформы» предназначена для управления двигателями с целью оптимального перераспределения энергии между ними и минимизации энергопотерь. Математическая модель размещена на нижнем уровне и

сформирована в соответствии с эквиприоритетными принципами координирующего управления. Модель базируется на математическом описании одного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= \frac{3p^2 L_m}{2JL_r} x_2 x_4 - \frac{pM}{J}, \\
 \dot{x}_2 &= \frac{L_m R_r}{L_r} x_3 - \frac{R_r}{L_r} x_2, \\
 \dot{x}_3 &= -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{kL_r} x_3 + x_1 x_4 + \frac{L_m R_r x_4^2}{L_r x_2} + \frac{L_m R_r}{kL_r} x_2 + \frac{L_r}{k} u_1, \\
 \dot{x}_4 &= -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{kL_r} x_4 - x_1 x_3 - \frac{L_m R_r x_3 x_4}{L_r x_2} - \frac{L_m}{k} x_1 x_2 + \frac{L_r}{k} u_2.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь  $x_1 = \omega_r$  – угловая скорость ротора,  $x_2 = \psi_r$  – потокосцепление ротора,  $x_3 = i_{sx}$  – проекция тока статора на ось абсцисс,  $x_4 = i_{sy}$  – проекция тока статора на ось ординат,  $R_s$  – сопротивление обмотки статора,  $R_r$  – сопротивление обмотки ротора,  $L_s$  – индуктивность обмотки статора,  $L_r$  – индуктивность обмотки ротора,  $L_m$  – взаимная индуктивность,  $p$  – число пар полюсов,  $J$  – момент инерции ротора,  $M$  – момент сопротивления на валу двигателя,  $k = L_s L_r - L_m^2$  [16].

В ходе управления двигателем выделяется два инварианта: технологический (стабилизация угловой скорости ротора  $x_1 = x_1^*$ ) и энергетический (минимизация энергопотерь за счёт поддержания оптимального потокосцепления ротора  $x_2 = x_2^*$ ). Энергетический инвариант описан ниже [20]:

$$x_2^* = \psi_{r\,opt} = M^{0,5} \left( \frac{k_1}{k_2 + k_3 \omega^\beta} \right)^{0,25}. \tag{5}$$

Значения коэффициентов  $k_i$ ,  $i = \overline{1,3}$ :

$$k_1 = \frac{4(r_s L_r^2 + r_r L_m^2)}{p^2 m L_m^2}, \quad k_2 = \frac{m r_s}{L_m^2}, \quad k_3 = \frac{\Delta P_{st\,nom}}{314^\beta \psi_{r\,nom}^2}.$$

В этом случае алгоритмы управления имеют вид:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \left( \frac{\varphi_3 - x_3}{T_3} + \frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{kL_r} x_3 - x_1 x_4 - \frac{L_m R_r x_4^2}{L_r x_2} - \frac{L_m R_r}{kL_r} x_2 \right) \frac{k}{L_r} + \dot{\varphi}_3, \\
 u_2 &= \left( \frac{\varphi_4 - x_4}{T_4} + \frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{kL_r} x_4 + x_1 x_3 + \frac{L_m R_r x_3 x_4}{L_r x_2} + \frac{L_m}{k} x_1 x_2 \right) \frac{k}{L_r} + \dot{\varphi}_4.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Здесь  $\varphi_3$ ,  $\varphi_4$  – внутренние управления.

**Моделирование динамики разработанной системы.** Графики моделирования разработанной иерархической системы балансировки пространственного положения «летающей платформы» с законами управления (2) и (6) показаны ниже на рис. 2–11. По сравнению с работами [9] и [10] в данной публикации применены уточнённые математические модели самого летательного аппарата и его силовых установок с учётом всех нелинейностей, присущих реальным объектам, в связи с чем повысилось качество синтеза и моделирования.

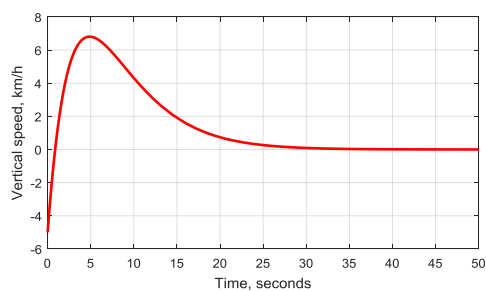


Рис. 2. График изменения вертикальной скорости (верхний уровень иерархии)

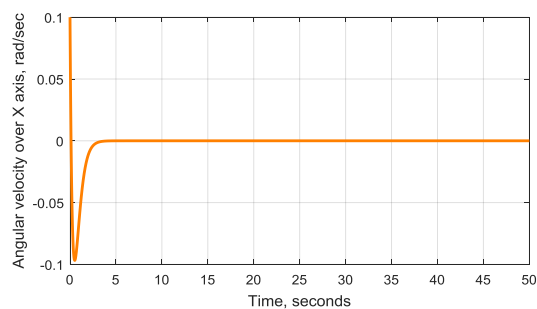


Рис. 3. График изменения угловой скорости относительно продольной оси (верхний уровень иерархии)

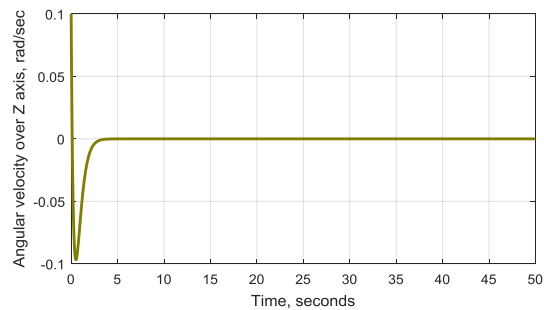


Рис. 4. График изменения угловой скорости относительно боковой оси (верхний уровень иерархии)

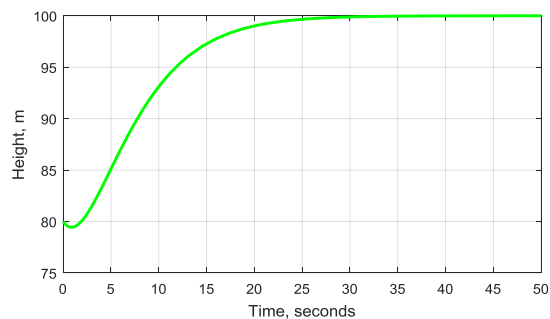


Рис. 5. График изменения высоты (верхний уровень иерархии)

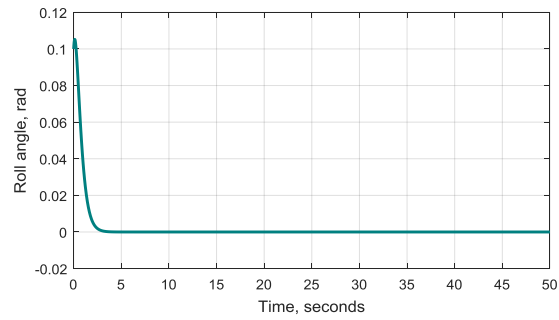


Рис. 6. График изменения угла крена (верхний уровень иерархии)

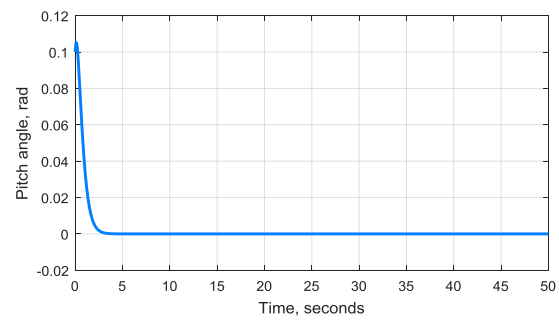


Рис. 7. График изменения угла тангажа (верхний уровень иерархии)

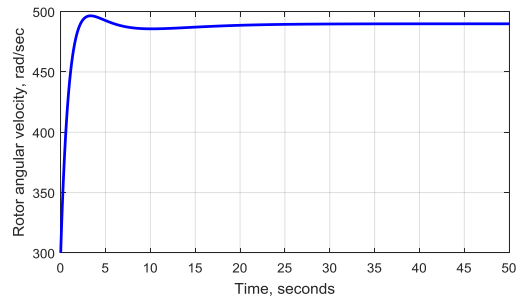


Рис. 8. График изменения угловой скорости ротора (нижний уровень иерархии)

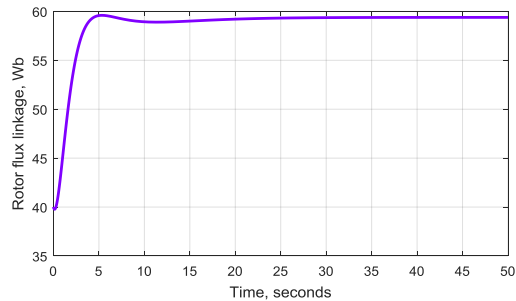


Рис. 9. График изменения потокосцепления ротора (нижний уровень иерархии)

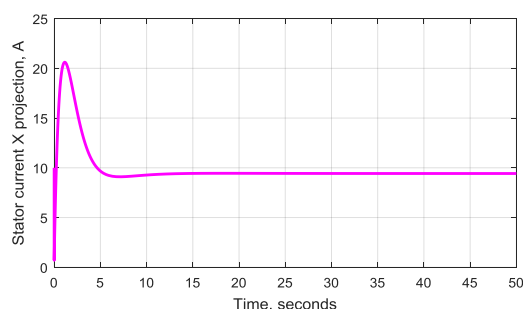


Рис. 10. График изменения проекции тока статора на ось абсцисс (нижний уровень иерархии)

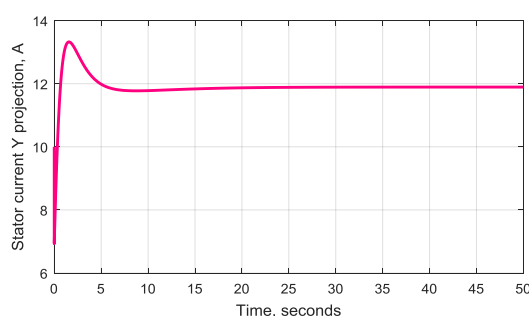


Рис. 11. График изменения проекции тока статора на ось ординат (нижний уровень иерархии)

Рис. 8–11 относятся к одному из двигателей; для остальных трёх двигателей графики моделирования аналогичны.

**Выводы.** В данной работе сформирована структура иерархической системы управления «летающей платформой» и синтезированы нелинейные законы управления. Результаты работы будут полезны при разработке новых типов пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, не использующих аэродинамические поверхности для создания подъёмной силы, например, квадрокоптеров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полётом. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 232 с.
2. Lambregts A.A. Vertical flight path and speed control autopilot using total energy principles // AIAA P1983. No. 2239CP.
3. Turner M.C., Aouf N., Bates D.G. et al. A switching scheme for full-envelope control of a V/STOL aircraft using LQ bumpless transfer // Proc. 2002 IEEE Internat. Conf. on Control Applications. Glasgow, Scotland, U.K., 2002.
4. Tsourdos A., White B.A. Adaptive flight control design for nonlinear missile // Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02). Barcelona, 2002.
5. Blumel A.V., Tsourdos A., White B.A. Flight control design for a STT Missile: a fuzzy LPV approach // Proc. 15th IFAC Symp. on Automatic Control in Aerospace. Bologna/Forli, Italy, 2001.
6. Tsourdos A., White B.A. Flight control design for quasi-linear parameter varying missile via pseudolinearisation // Prepr. 5th IFAC Symp. NOLCOS'01. St. Petersburg, Russia, 2001.
7. Farren D., Duc G., Harcaut J.P. Discrete-time LPV controller for robust missile autopilot design // Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02). Barcelona, 2002.



8. Пат. РФ №2348568. Лёгкий многорежимный летательный аппарат / Воронков Ю.С., Воронков О.Ю.
9. Воронков О.Ю. Синергетический синтез иерархической системы управления «Аэромобилем» в режиме балансировки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 5 (118). – С. 55-60.
10. Воронков О.Ю. Синергетический синтез иерархической системы балансировки «Аэромобилем» с асимптотическим наблюдателем гармонических возмущений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 6 (119). – С. 153-161.
11. Курочкин Ф.П. Основы проектирования самолётов с вертикальным взлётом и посадкой. – М.: Машиностроение, 1970. – 354 с.
12. Шайдаков В.И. Аэродинамика винта в кольце. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 88 с.
13. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – Таганрог: ТРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
14. Современная прикладная теория управления. Ч. I: Оптимизационный подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.–Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.
15. Современная прикладная теория управления. Ч. II: Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.–Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 559 с.
16. Современная прикладная теория управления. Ч. III: Новые классы регуляторов технических систем / под ред. А.А. Колесникова. – М.–Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 656 с.
17. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Колесников Ал.А. Синергетическая теория управления нелинейными взаимосвязанными электромеханическими системами. – Таганрог. Изд-во ТРТУ, 2000. – 182 с.
18. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерации электроэнергии. – М.: 2009. – 323 с.
19. Колесников А.А., Мушенко А.С. Синергетическое управление процессами пространственного движения летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 2. – С. 38-45.
20. Попов А.Н. Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами. – Таганрог. Изд-во ТРТУ, 2003. – 67 с.

#### REFERENCES

1. Bukov V.N. Adaptivnye prognoziryuyushchie sistemy upravleniya poletom [Adaptive predictive flight control systems]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1987, 232 p.
2. Lambregts A.A. Vertical flight path and speed control autopilot using total energy principles, AIAA P1983. No. 2239CP.
3. Turner M.C., Aouf N., Bates D.G. et al. A switching scheme for full-envelope control of a V/STOL aircraft using LQ bumpless transfer, Proc. 2002 IEEE Internat. Conf. on Control Applications. Glasgow, Scotland, U.K., 2002.
4. Tsourdos A., White B.A. Adaptive flight control design for nonlinear missile, Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02). Barcelona, 2002.
5. Blumel A.V., Tsourdos A., White B.A. Flight control design for a STT Missile: a fuzzy LPV approach, Proc. 15th IFAC Symp. on Automatic Control in Aerospace. Bologna/Forli, Italy, 2001.
6. Tsourdos A., White B.A. Flight control design for quasi-linear parameter varying missile via pseudolinearisation, Prepr. 5th IFAC Symp. NOLCOS'01. St. Petersburg, Russia, 2001.
7. Farren D., Duc G., Harcaut J.P. Discrete-time LPV controller for robust missile autopilot design, Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02). Barcelona, 2002.
8. Voronkov Yu.S., Voronkov O.Yu. Legkiy mnogorezhimnyy letatel'nyy apparat [Light multi-mode aircraft]. Patent RF No. 2348568.
9. Voronkov O.Yu. Синергетический синтез иерархической системы управления «Аэромобилем» в режиме балансировки [Synergetic synthesis of hierarchical systems of control "Aircar" in the balancing], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 5 (118), pp. 55-60.
10. Voronkov O.Yu. Синергетический синтез иерархической системы балансировки «Аэромобилем» с асимптотическим наблюдателем гармонических возмущений [Synergetic synthesis of a hierarchical system balancing "flying car" with asymptotic observer of harmonic disturbances], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 6 (119), pp. 153-161.

11. *Kurochkin F.P.* Osnovy proektirovaniya samoletov s vertikal'nym vzletom i posadkoy [Fundamentals of aircraft design with vertical takeoff and landing]. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 354 p.
12. *Shaydakov V.I.* Aerodinamika vinta v kol'tse [Aerodynamics of the screw in the ring]. Moscow: Izd-vo MAI, 1996, 88 p.
13. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. Taganrog: TRTU, Moacow: Energoatomizdat, 1994, 344 p.
14. *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya. Ch. I: Optimizatsionnyy podkhod v teorii upravleniya* [Modern applied control theory. Part I: Optimization approach in control theory], ed. by A.A. Kolesnikova. Moscow–Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 400 p.
15. *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya. Ch. II: Sinergeticheskiy podkhod v teorii upravleniya* [Modern applied control theory. Part II: Synergetic approach in control theory], ed. by A.A. Kolesnikova. Moscow–Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 559 p.
16. *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya. Ch. III: Novye klassy regulyatorov tekhnicheskikh sistem* [Modern applied control theory. Part III: New classes of regulators of technical systems], ed. by A.A. Kolesnikova. Moscow–Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 656 p.
17. *Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N., Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskaya teoriya upravleniya nelineynymi vzaimosvyazannymi elektromekhanicheskimi sistemami [Synergetic theory of control of nonlinear interconnected Electromechanical systems]. Taganrog. Izd-vo TRTU, 2000, 182 p.
18. *Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Kuz'menko A.A.* Novye tekhnologii proektirovaniya sovremennykh sistem upravleniya protsessami generatsii elektroenergii [New design technologies of modern control systems for power generation processes]. Moscow: 2009, 323 p.
19. *Kolesnikov A.A., Mushenko A.S.* Sinergeticheskoe upravlenie protsessami prostranstvennogo dvizheniya letatel'nykh apparatov [Synergetic control of the processes of spatial motion of aircraft], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2004, No. 2, pp. 38-45.
20. *Popov A.N.* Sinergeticheskiy sintez zakonov energosberegayushchego upravleniya elektromekhanicheskimi sistemami [Synergetic synthesis of the laws of energy-saving control of electromechanical systems]. Taganrog. Izd-vo TRTU, 2003, 67 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

**Воронков Олег Юрьевич** – Научно-технический центр «Техноцентр» Южного федерального университета; e-mail: oleg.voronkov.1985@gmail.com; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: +79508449549; к.т.н.; научный сотрудник.

**Voronkov Oleg Yurievich** – Scientific and Technical Center “Technocenter” Southern Federal University; e-mail: oleg.voronkov.1985@gmail.com; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79508449549; cand. of eng. sc.; researcher.