

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Загидуллин Р.Ш. LabView в исследованиях и разработках. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 352 с.
2. Евдокимов Ю.К., Линдваль В.Р., Щербаков Г.И. LabView для радионинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabView. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 400 с.
3. Блюм П. LabView: стиль программирования: Пер. с англ. / Под ред. Михеева П. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 400 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Е. Панич.

**Синютин Евгений Сергеевич**

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

E-mail: ssin@mail.ru.

347900, ул. Петровская, 81.

Тел.: 88634311143.

**Siniutin Evgeniy Sergeevich**

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

E-mail: ssin@mail.ru.

81, Petrovskaya Street, Taganrog, 347900, Russia.

Phone: +78634311143.

УДК 629.73.05

**О.Ю. Воронков**

**СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ «АЭРОМОБИЛЕМ» В РЕЖИМЕ БАЛАНСИРОВКИ**

*Актуальность работы состоит в необходимости создания вертикально взлетающего аппарата «Аэромобиль» 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, к координирующему энергосберегающему управлению электродвигателями, получающими энергию от турбогенераторной установки ограниченной мощности.*

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

**O.Yu. Voronkov**

**SYNERGETIC SYNTHESIS OF HIERARCHIC CONTROL SYSTEM  
OF “AIRMObILE” IN THE BALANCING MODE**

*The actuality of the work consists in the necessity of “flying platform” type “Airmobile” vertical take-off vehicle creation with a view of effectiveness increase in the sphere of people rescue operations in those disaster areas where helicopters & other modern means don't cope with a task. The scientific newness of the work consists in synergetic approach application to the design of the hierarchic system of the vehicle's spatial position & to the active energy-save control over the electric engines that get energy from the turbogenerator unit of bounded power.*

*“Flying platform”; fan in the coil; synergetic control theory; functional decomposition; energy-save control.*

Летательный аппарат «Аэромобиль» относится к типу «летающая платформа». Под этим типом понимаются аппараты вертикального взлёта и посадки, использующие для создания подъёмной силы работу вентиляторов малого диаметра, размещаемых, как правило, в аэродинамических кольцах, назначение которых заключено в создании дополнительной тяги и защите вентиляторов от соударений с посторонними предметами [6].

«Аэромобиль» содержит фюзеляж в виде аэродинамического крыла малого удлинения, обеспечивающего небольшую подъёмную силу на максимальных скоростях полёта (около 150 км/ч) в дополнение к основной силе тяги вентиляторов. Внутри фюзеляжа расположено четыре электродвигателя с вентиляторами (два впереди и два сзади), получающих энергию от турбогенераторной установки. Продольное управление аппаратом осуществляется путём дифференциального изменения тяги пары передних и пары задних вентиляторов, а поперечное – путём дифференциального изменения силы тяги боковых вентиляторов, расположенных справа и слева.

Аппарат управляется как командными органами с рабочего места экипажа (путевое управление), так и системой автоматического управления (балансировка пространственного положения). Система автоматического управления основана на принципах синергетической теории, развиваемой в ТТИ ЮФУ на кафедре синергетики и процессов управления под руководством проф. А.А. Колесникова. В этой системе также решается задача оптимального распределения энергии между источниками питания и силовыми установками [1].

Непременным условием устойчивости аппарата, диктуемым аэродинамической схемой и диапазоном скоростей, является пространственное положение, близкое к горизонтальному. В связи с этим допустимо сформулировать понятие режима балансировки. Этот режим является выделением из любого режима полёта компонентов управления, направленных на сохранение аппаратом горизонтального положения независимо от распределения нагрузки по площади фюзеляжа. Частным случаем режима балансировки представляется режим висения, т.е. полёта с нулевой горизонтальной скоростью [4]. Математические описания режимов балансировки и висения идентичны для «Аэромобилия». Данная работа направлена на синтез синергетической системы балансировки пространственного положения аппарата.

При синтезе регуляторов для сложных технических объектов широко применяется функциональная декомпозиция процессов управления, представляющая собой разбиение общей цели управления на ряд частных задач, расположенных на разных уровнях иерархии. В результате формируется иерархическая система управления, блок-схема которой показана на рис. 1.

На верхнем уровне иерархии формируются управляющие стратегии общего вида, затем они поступают на средний уровень, где посредством уравнений связи преобразуются в задающие воздействия нижнего уровня, на котором синтезируются частные управляющие воздействия [3].

Математическая модель «Аэромобилия» в режиме балансировки выглядит так:

$$\dot{x}_1 = \frac{u_1}{m}, \quad \dot{x}_2 = \frac{u_2}{I_x}, \quad \dot{x}_3 = \frac{u_3}{I_z}, \quad \dot{x}_4 = x_1, \quad \dot{x}_5 = x_2, \quad \dot{x}_6 = x_3. \quad (1)$$

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 по вертикальной оси,  $u_2 = M_x$  – равнодействующая мо-

ментов по продольной оси,  $u_3 = M_z$  – равнодействующая моментов по боковой оси,  $m$  – масса аппарата,  $I_x, I_z$  – моменты инерции относительно продольной и поперечной осей [4].

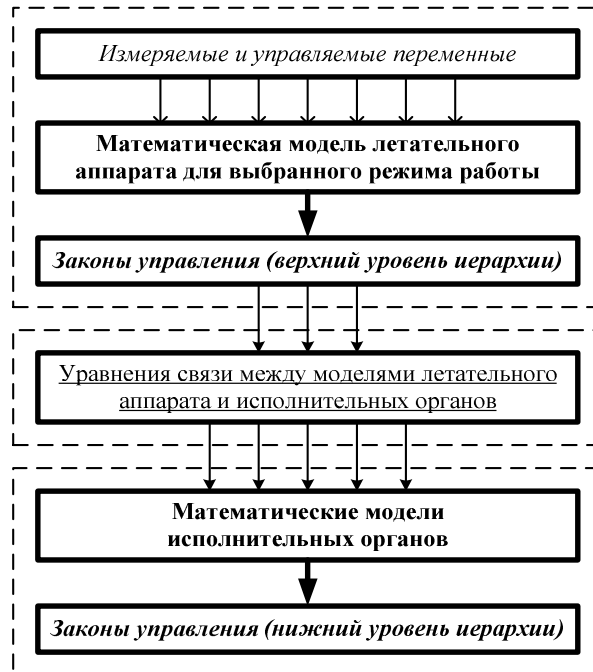


Рис. 1. Блок-схема иерархической системы балансировки «Аэромобиль»

Технологическими инвариантами (целями управления) являются стабилизация 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 [2], синтезируются алгоритмы управления верхнего уровня:

$$u_1 = -m \left( \frac{\Psi_1}{T_1} + \frac{\dot{\Psi}_4}{T_4} \right), \quad u_2 = -I_x \left( \frac{\Psi_2}{T_2} + \frac{\dot{\Psi}_5}{T_5} \right), \quad u_3 = -I_z \left( \frac{\Psi_3}{T_3} + \frac{\dot{\Psi}_6}{T_6} \right). \quad (3)$$

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

Уравнения связи, находящиеся на среднем уровне, формируются с учётом компоновочной схемы «Аэромобиль» и аэродинамических параметров его вентиляторных установок. Общий вид описанных уравнений:

$$\omega_1 = \frac{8}{D_B^2} \sqrt{\frac{\bar{T}_B \left( u_1 + \frac{u_2}{l_x} + \frac{u_3}{l_z} + mg \right)}{\frac{\chi_K}{3} \sigma_7 c_{y0} \pi}}, \quad \omega_2 = \frac{8}{D_B^2} \sqrt{\frac{\bar{T}_B \left( u_1 - \frac{u_2}{l_x} + \frac{u_3}{l_z} + mg \right)}{\frac{\chi_K}{3} \sigma_7 c_{y0} \pi}}, \quad (4)$$

$$\omega_3 = \frac{8}{D_B^2} \sqrt{\frac{\bar{T}_B \left( u_1 + \frac{u_2}{l_x} - \frac{u_3}{l_z} + mg \right)}{\frac{\chi_k}{3} \sigma_7 c_{y0} \pi}}, \quad \omega_4 = \frac{8}{D_B^2} \sqrt{\frac{\bar{T}_B \left( u_1 - \frac{u_2}{l_x} - \frac{u_3}{l_z} + mg \right)}{\frac{\chi_k}{3} \sigma_7 c_{y0} \pi}}. \quad (4)$$

Здесь  $D_B = 1 \text{ м}$  – диаметр вентилятора,  $\bar{T}_B = 0,7$  – относительная тяга вентилятора,  $\chi_k = 0,96$  – коэффициент концевых потерь,  $\sigma_7 = 0,318$  – коэффициент заполнения вентилятора,  $c_{y0} = 0,7$  – аэродинамический коэффициент [6].

Система синхронизации силовых установок «Аэромобиль» 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 одной силовой установки, в роли которой выступает асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{3p^2 L_m}{2JL_r} x_2 x_4 - \frac{pM_c}{J}, \quad \dot{x}_2 = \frac{L_m R_r}{L_r} x_3 - \frac{R_r}{L_r} x_2, \\ \dot{x}_3 &= -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{kL_r} x_3 + x_1 x_4 + \frac{L_m R_r x_4^2}{L_r x_2} + \frac{L_m R_r}{kL_r} x_2 + \frac{L_r}{k} u_1, \\ \dot{x}_4 &= -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{kL_r} x_4 - x_1 x_3 - \frac{L_m R_r x_3 x_4}{L_r x_2} - \frac{L_m}{k} x_1 x_2 + \frac{L_r}{k} u_2. \end{aligned} \quad (5)$$

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,  $M_c$  – момент сопротивления на валу двигателя,  $k = L_s L_r - L_m^2$  [2].

В ходе управления двигателем выделяется два инварианта: технологический (стабилизация угловых скоростей роторов  $x_1 = x_1^*$ ) и энергетический (минимизация энергопотерь за счёт поддержания оптимальных потокосцеплений роторов  $x_2 = x_2^*$ ). Энергетический инвариант имеет вид [5]:

$$x_2^* = \psi_{r \text{ опт}} = M_c^{0,5} \left( \frac{k_1}{k_2 + k_3 \omega^\beta} \right)^{0,25}. \quad (6)$$

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

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

В этом случае алгоритмы управления имеют вид:

$$u_1 = \frac{\left( \frac{\varphi_3 - x_3}{T_3} + \frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{k L_r} x_3 - x_1 x_4 - \frac{L_m R_r x_4^2}{L_r x_2} - \frac{L_m R_r}{k L_r} x_2 \right) k}{L_r} + \dot{\varphi}_3, \quad (7)$$

$$u_2 = \frac{\left( \frac{\varphi_4 - x_4}{T_4} + \frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{k L_r} x_4 + x_1 x_3 + \frac{L_m R_r x_3 x_4}{L_r x_2} + \frac{L_m}{k} x_1 x_2 \right) k}{L_r} + \dot{\varphi}_4.$$

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

Графики моделирования синтезированной иерархической системы балансировки пространственного положения «Аэромобилия» приведены на рис. 2 и рис. 3.

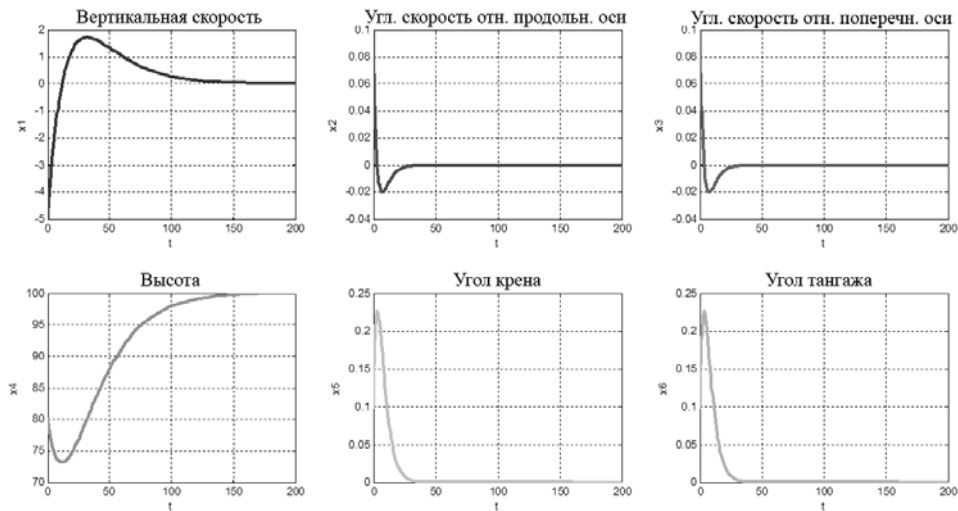


Рис. 2. Моделирование динамики «Аэромобилия» (верхний уровень иерархии)

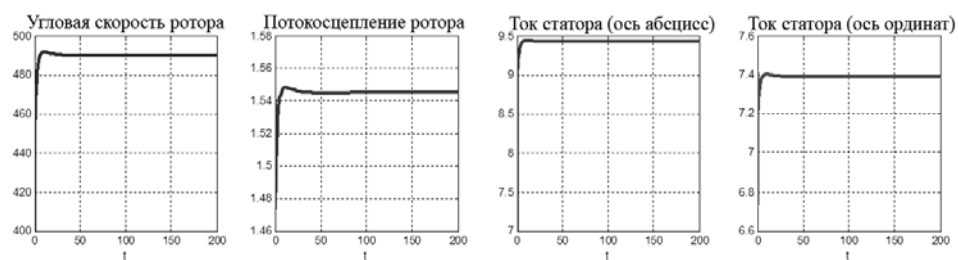


Рис. 3. Моделирование динамики двигателя (нижний уровень иерархии).  
Для остальных трёх двигателей графики моделирования аналогичны

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронков Ю.С., Воронков О.Ю. Лёгкий многорежимный летательный аппарат. Патент РФ №2348568 от 29.06.2007.
2. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем. Ч.III. /Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.

3. Колесников А.А., Мушенко А.С. Синергетическое управление процессами пространственного движения летательных аппаратов // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2004. – № 2.
4. Курочкин Ф.П. Основы проектирования самолётов с вертикальным взлётом и посадкой. – М.: Машиностроение, 1970.
5. Попов А.Н. Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электро-механическими системами. – Таганрог: Изд-во ТРТУ. 2003.
6. Шайдаков В.И. Аэродинамика винта в кольце: Учебное пособие. – М.: Изд-во Московского авиационного института, 2006.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

**Воронков Олег Юрьевич**

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

E-mail: voronkovoyu@mail.ru.

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

Тел.: +78634318090.

**Voronkov Oleg Yurievich**

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

E-mail: voronkovoyu@mail.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634318090.

УДК 621.37

**А.О. Киреев, А.В. Светлов**

**РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ**

*Ограниченные энергетические ресурсы беспроводных сенсорных сетей являются основным сдерживающим фактором их развития. Стандартные средства измерения не позволяют получить прецизионные количественные измерения энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей в реальном времени. Проведен анализ параметров энергопотребления беспроводных сенсорных сетей. Определена структура и схемотехническая реализация датчика тока с программным управлением. Разработана распределенная система энергетического мониторинга узлов беспроводных сенсорных сетей.*

*Распределенная система; энергопотребление; энергетический мониторинг; беспроводные сенсорные сети; датчик тока; управляемый измерительный резистор.*

**A.O. Kireev, A.V. Svetlov**

**DISTRIBUTED SYSTEM OF ENERGY MONITORING FOR WIRELESS  
SENSOR NETWORKS**

*The finite energy resources are the principal constraint of wireless sensor networks. The standard electronic instrumentation can't get the precision quantitative real-time measurements of wireless sensor networks power consumption. The analysis of power consumption parameters for wireless sensor networks is performed. The structure of current sensor based on controlled instrument resistor is proposed. Distributed system of energy monitoring for wireless sensor networks is designed.*

*Distributed system; power consumption; energy monitoring; wireless sensor networks; current sensor; controlled current-sensing resistor.*