

Синергетический синтез иерархической системы управления «летающей платформой»

О. Ю. Воронков

Институт компьютерных технологий и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Российская Федерация
ovoronkov@sfedu.ru

Аннотация. 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. 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.

Ключевые слова: «летающая платформа»; вентилятор в кольце; синергетическая теория управления; функциональная декомпозиция; энергосберегающее управление

I. ВСТУПЛЕНИЕ

В последние десятилетия перед конструкторами транспорта, в том числе летательных аппаратов, стоит задача синтеза автопилотов для различных режимов работы машин. Наиболее сложными являются случаи, когда объектом управления служит аппарат нетрадиционной компоновки. Например, в авиационной сфере идёт интенсивное освоение новых аэродинамических схем, имеющих нестандартное расположение аэродинамических поверхностей или их полное отсутствие, нестандартное размещение движителей и их новые типы. Существующие наработки по аппаратам классических компоновок малоприменимы для анализа динамики новых типов аппаратов, создания их математических моделей и синтеза управляющих алгоритмов. Поэтому требуются новые подходы к управлению такими объектами с учётом всех нелинейностей их динамики.

II. ОПИСАНИЕ «ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ» И ЕЁ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Предлагаемый летательный аппарат [1–3] относится к типу «летающая платформа». Этот тип представляет собой вертикально взлетающий аппарат [4], 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 [5].

«Летающая платформа», описанная в данной работе, содержит фюзеляж в виде аэродинамического крыла малого удлинения, которое обеспечивает небольшую подъёмную силу на высоких скоростях (до 150 км/ч) в дополнение к основной тяге силовых установок. Силовыми установками являются четыре электрических двигателя с вентиляторами (два передних и два задних), расположенные внутри фюзеляжа и получающие энергию от турбогенераторной установки. Продольное управление аппаратом реализуется путём дифференциального изменения тяги пары передних и пары задних вентиляторов, а поперечное управление аппаратом реализуется путём дифференциального изменения тяги пары правых и пары левых вентиляторов.

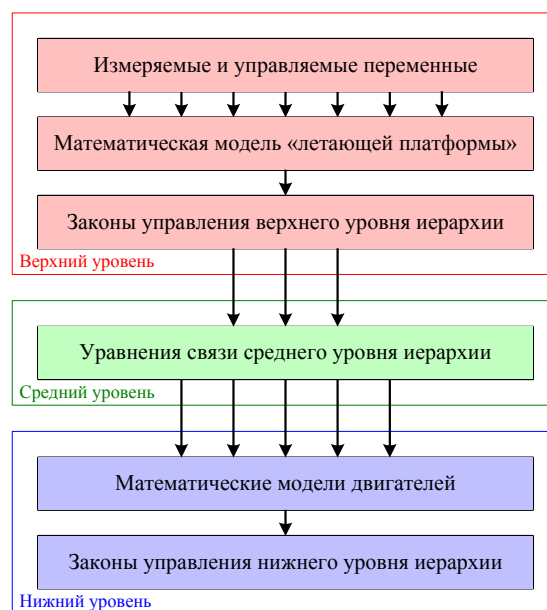


Рис. 1. Блок-схема иерархической системы управления предлагаемой «летающей платформой»

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 [6–9]. Эта система также оптимизирует распределение энергии между источниками питания (турбогенераторами) и силовыми установками (электродвигателями) [10], [11].

При синтезе регуляторов для сложных технических объектов часто применяется функциональная декомпозиция процессов управления, которая предполагает разделение общей цели управления на ряд частных задач, расположенных на разных уровнях иерархии. В результате использования функциональной декомпозиции формируется иерархическая система управления, показанная на рис. 1 в виде блок-схемы.

На верхнем уровне иерархии рассчитываются общие стратегии управления. Они применяются на среднем уровне иерархии для выработки целей управления нижнего уровня с использованием уравнений связи. На нижнем уровне иерархии синтезируются частные управляющие воздействия [12].

III. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ ИЕРАРХИИ

Нелинейная математическая модель «летающей платформы» в режиме вертикального движения показана ниже:

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

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 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 [4].

Технологическими инвариантами (целями управления) являются стабилизации высоты $x_4 = x_4^*$, угла тангажа $x_5 = x_5^*$, угла крена $x_6 = x_6^*$. С применением метода аналитического конструирования агрегированных

регуляторов (АКАР), который является основным методом синергетической теории управления [6], 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 формулах (2):

$$\Psi_1 = x_1 - \varphi_1, \quad \Psi_2 = x_2 - \varphi_2, \quad \Psi_3 = x_3 - \varphi_3;$$

$$\dot{\Psi}_4 = \dot{x}_4 = \varphi_1, \quad \dot{\Psi}_5 = \dot{x}_5 = \varphi_2, \quad \dot{\Psi}_6 = \dot{x}_6 = \varphi_3;$$

$$\varphi_1 = -\frac{\Psi_4}{T_4}, \quad \varphi_2 = -\frac{\Psi_5}{T_5}, \quad \varphi_3 = -\frac{\Psi_6}{T_6};$$

$$\Psi_4 = x_4 - x_4^* = 0, \quad \Psi_5 = x_5 - x_5^* = 0, \quad \Psi_6 = x_6 - x_6^* = 0.$$

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

IV. УРАВНЕНИЯ СВЯЗИ СРЕДНЕГО УРОВНЯ ИЕРАРХИИ

Уравнения связи среднего уровня составляются с опорой на компоновочную схему «летающей платформы» и на аэродинамические характеристики её вентиляторных установок. Уравнения показаны ниже:

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

В выражениях (3) $D_f = 1 \text{ м}$ – 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 [5].

V. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ НИЖНЕГО УРОВНЯ ИЕРАРХИИ

Система синхронизации силовых установок «летающей платформы» необходима для управления электродвигателями, для оптимального перераспределения энергии между ними и для минимизации потерь энергии. Нелинейная математическая модель этой системы находится на нижнем уровне и сформирована в соответствии с эквиприоритетными принципами координирующего управления. Модель основывается на математическом описании одного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

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

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, $k = L_s L_r - L_m^2$ [9].

При управлении двигателем выделяется два инварианта: технологический (стабилизация угловой скорости ротора $x_1 = x_1^*$) и энергетический (минимизация потерь энергии за счёт поддержания оптимального потокосцепления ротора $x_2 = x_2^*$). Энергетический инвариант [13] представлен ниже:

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

Значения коэффициентов k_i , $i=1,3$:

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

В этом случае алгоритмы управления имеют вид:

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

Здесь φ_3, φ_4 – внутренние управления. Законы (6) получены с применением той же процедуры синтеза методом АКАР, что и законы (2). Для выражений (6) эта процедура не приводится ввиду большого объёма вычислений.

VI. 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.

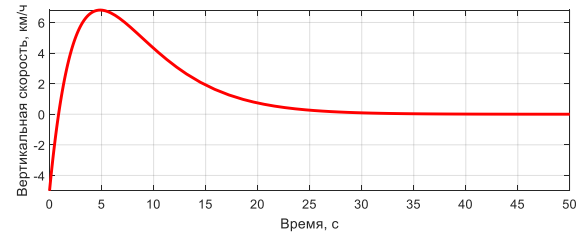


Рис. 2. График изменения вертикальной скорости (верхний уровень иерархии)

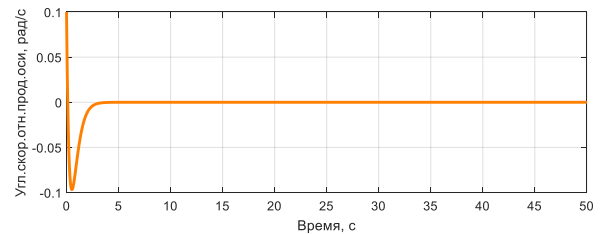


Рис. 3. График изменения угловой скорости относительно продольной оси (верхний уровень иерархии)

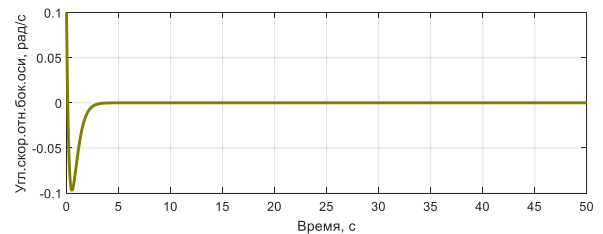


Рис. 4. График изменения угловой скорости относительно боковой оси (верхний уровень иерархии)

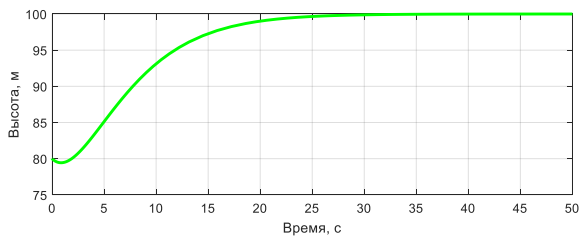


Рис. 5. График изменения высоты (верхний уровень иерархии)

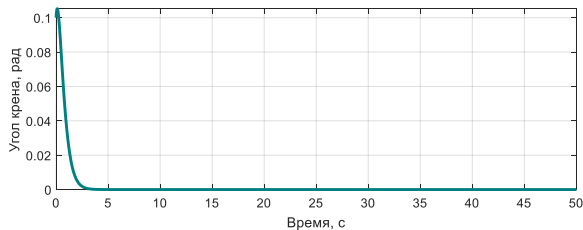


Рис. 6. График изменения угла крена (верхний уровень иерархии)

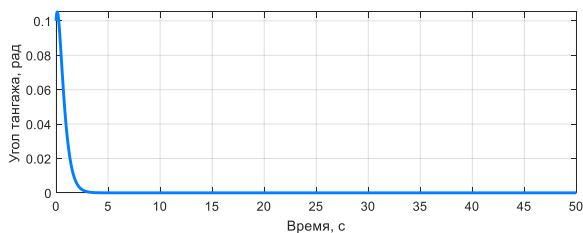


Рис. 7. График изменения угла тангажа (верхний уровень иерархии)

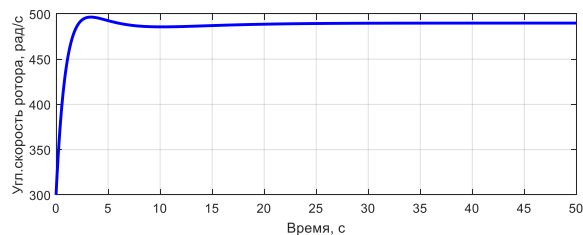


Рис. 8. График изменения угловой скорости ротора (нижний уровень иерархии)

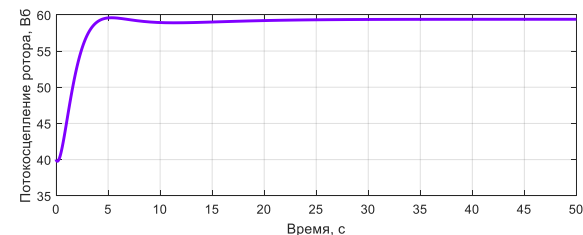


Рис. 9. График изменения потокоцепления ротора (нижний уровень иерархии)

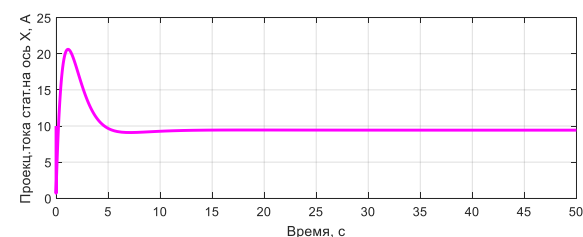


Рис. 10. График изменения проекции тока статора на ось абсцисс (нижний уровень иерархии)

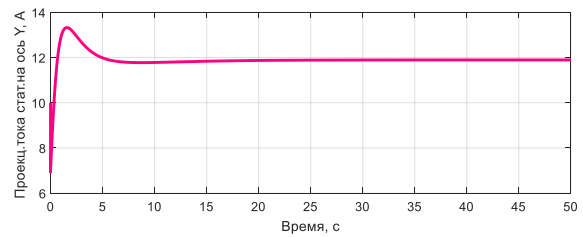


Рис. 11. График изменения проекции тока статора на ось ординат (нижний уровень иерархии)

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

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описана структура иерархической системы управления «летающей платформой», приведено математическое описание всех её уровней и синтезированы нелинейные законы управления. Результаты работы будут полезны для конструирования новых типов пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, не использующих аэродинамические поверхности для создания подъёмной силы, например, квадрокоптеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Пат. РФ №2348568 / Ю.С. Воронков, О.Ю. Воронков. Лёгкий многорежимный летательный аппарат; Оpubл. 10.03.09. Бюл. № 7.
- [2] Воронков О.Ю. Синергетический синтез иерархической системы управления «Аэромобилем» в режиме балансировки // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 5 (118). С. 55–60.
- [3] Воронков О.Ю. Синергетический синтез иерархической системы балансировки «Аэромобиля» с асимптотическим наблюдателем гармонических возмущений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 6 (119). С. 153–161.
- [4] Курочкин Ф.П. Основы проектирования самолётов с вертикальным взлётом и посадкой. М.: Машиностроение, 1970. 354 с.
- [5] Шайдаков В.И. Аэродинамика винта в кольце. М.: Издательство Московского Авиационного Института, 1996. 88 с.
- [6] Колесников А.А. Синергетическая теория управления. Таганрог: ТРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
- [7] Современная прикладная теория управления. Ч.1: Оптимизационный подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. Москва – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 400 с.
- [8] Современная прикладная теория управления. Ч.2: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. Москва– Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 559 с.
- [9] Современная прикладная теория управления. Ч.3: Новые классы регуляторов технических систем / Под ред. А.А. Колесникова. Москва – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 656 с.
- [10] 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.
- [11] Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии. М.: Изд. дом МЭИ, 2011. 280 с.
- [12] Колесников А.А., Мушенко А.С. Синергетическое управление процессами пространственного движения летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2004. №2. С. 38–45.
- [13] Попов А.Н. Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. 67 с.