

**Пшихопова Карина Вячеславовна** – e-mail: pshihopova@yandex.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко 2; тел. +78634371694; НИИ Робототехники и процессов управления; инженер.

**Веревкина Лина Станиславовна** – e-mail: lverevkina@sfnedu.ru; тел.: +78634371694; кафедра электротехники и механики; к.т.н.; доцент.

**Boldyrev Anton Sergeevich** – Southern Federal University; e-mail: boldyrev@sfnedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371634; Institute of Radio Engineering Systems and Control; cand. tng. sc.; director.

**Verevkin Alexander Leonidovich** – e-mail: verevkin.a@mail.ru; the department of aircraft; graduate student.

**Pshikhopova Karina Vyacheslavovna** – e-mail: pshihopova@yandex.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371694; Research Institute of Robotics and Control Processes; engineer.

**Verevkina Lina Stanislavovna** – e-mail: lverevkina@sfnedu.ru; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; cand/ uf eng. sc.; associate professor.

УДК 629.735.4

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-29-39

**О.Ю. Воронков**

### **СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМОЙ»**

*Работа посвящена синергетическому синтезу асимптотического наблюдателя гармонических возмущений для иерархической системы управления летательным аппаратом. Статья содержит общее описание вертикально взлетающего аппарата типа «летающая платформа» и асимптотического наблюдателя внешних возмущающих воздействий (например, ветровых), изменяющихся по гармоническому закону и приводящих к периодическим изменениям высоты полёта, а также углов тангажа и крена. Асимптотический наблюдатель должен обеспечить асимптотическую устойчивость замкнутой системы, выполнение технологических инвариантов, оценку ненаблюдаемых внешних воздействий по текущим значениям наблюдаемых координат состояния и поглощение гармонических ветровых возмущений. Также в статье приведена расширенная математическая модель «летающей платформы» в режиме вертикального движения в условиях внешних гармонических возмущающих воздействий, включающая математическое описание динамики возмущений, и на основе заданных технологических инвариантов синтезированы алгоритмы управления верхнего уровня иерархии. Кроме этого, проведён расчёт уравнений асимптотического наблюдателя возмущающих воздействий, которыми дополняется математическая модель «летающей платформы» в условиях возмущённого движения, и уравнений для асимптотических оценок ненаблюдаемых переменных, в дальнейшем включаемых в законы управления верхнего уровня иерархии. Возможность синтеза наблюдателя возмущений проверена с помощью критерия наблюдаемости. Наконец, показаны результаты компьютерного моделирования нелинейной динамики верхнего и нижнего уровней иерархии в условиях возмущённого движения с подавлением внешних возмущений асимптотическим наблюдателем, а также результаты компьютерного моделирования нелинейной динамики аппарата в условиях возмущённого движения без асимптотического наблюдателя для возможности наглядной оценки качества работы наблюдателя путём сравнения. Актуальность работы состоит в необходимости создания вертикально взлетающего аппарата типа «летающая платформа» для повышения эффективности спасения людей из зон бедствий, где вертолёты и другие современные средства не справляются с задачами. Научная новизна работы заключена в применении синергетических подходов к разработке системы балансировки пространственного положения аппарата, оснащённой асимптотическим наблюдателем для подавления возмущающих воздействий.*

*«Летающая платформа»; вентилятор в кольце; синергетическая теория управления; гармонические возмущения; асимптотический наблюдатель.*

O.Yu. Voronkov

**SYNERGETIC SYNTHESIS OF A DISTURBANCE OBSERVER  
FOR THE “FLYING PLATFORM” CONTROL SYSTEM**

*The work is devoted to the synergetic synthesis of the harmonic disturbance asymptotic observer for the aircraft hierarchical control system. The paper contains the general description of “flying platform” type vertical take-off & landing aircraft & an asymptotic observer of external disturbing influences (for example, wind) that have a harmonic dynamics & cause periodic changes in flight height, as well as in pitch & roll angles. An asymptotic observer must ensure the asymptotic stability of a reserved system, the implementation of technological invariants, the estimation of unobservable external influences from the current values of the observed state-space variables, & the absorption of harmonic wind disturbances. The article also presents an extended mathematical model of the “flying platform” in the vertical movement mode under external harmonic disturbing influences, including a mathematical description of the disturbance dynamics, & the upper hierarchy level control algorithms based on the given technological invariants are synthesized. In addition, the equations of the disturbing influences asymptotic observer are calculated, which supplement the mathematical model of the “flying platform” under disturbed motion, & the equations for asymptotic estimates of unobserved variables are calculated, which are further included in the upper hierarchy level control laws. The possibility of the disturbance observer synthesis was verified using the observability criterion. Finally, the results of computer simulation of the upper & the lower hierarchy levels’ nonlinear dynamics under disturbed motion with suppression of external disturbances by an asymptotic observer are shown, as well as the results of computer simulation of the vehicle’s nonlinear dynamics under disturbed motion without an asymptotic observer to allow a visual assessment of the observer’s performance by comparison. 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 system equipped with an asymptotic observer to suppress disturbing influences.*

*“Flying platform”; fan in the ring; synergetic control theory; harmonic disturbance; asymptotic observer.*

**Введение.** В данной работе рассматривается летательный аппарат, описанный ранее в материалах [1–4] и относящийся к типу «летающая платформа». Этот тип представляет собой вертикально взлетающий аппарат [5], оснащённый подъёмными вентиляторами, которые обычно помещены в аэродинамические кольца, предназначенные для создания дополнительной тяги и для защиты вентиляторов от механических воздействий [6].

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. Система автоматического управления представляет собой автопилот [7–13] для балансировки пространственного положения аппарата. Эта система основана на принципах синергетической теории, развиваемой на Кафедре синергетики и процессов управления Южного федерального университета под руководством проф. А.А. Колесникова [14–17].

**Описание наблюдателя возмущений для «летающей платформы».** В работах [2, 4] был выполнен синергетический синтез иерархической [18] системы балансировки пространственного положения «летающей платформы» с учётом наблюдаемости всех координат состояния и отсутствия внешних воздействий. В действительных условиях математическая модель верхнего уровня иерархии (математическая модель «летающей платформы») неизбежно подвергается влиянию возмущений, например, ветровых, переменные состояния которых являются неизмеряемыми.

Следовательно, возникает необходимость в построении асимптотического наблюдателя [3], функцией которого является оценка координат возмущений по текущим значениям измеряемых переменных в динамической модели объекта. В ходе применения метода АКАР внешние возмущения погружаются в общую структуру системы и в дальнейшем рассматриваются как координаты состояния объекта. В связи с этим не возникает никакой разницы между процедурами построения асимптотических наблюдателей координат состояния и внешних возмущений [16].

Для того чтобы оказалась возможной процедура учёта и компенсации внешних возмущающих воздействий, требуется дополнить математическую модель «летающей платформы», находящуюся на верхнем уровне иерархии, моделями гармонических ветровых возмущений, приводящих к периодическим изменениям высоты полёта, а также углов тангажа и крена. Асимптотический наблюдатель гармонических возмущающих воздействий синтезируется в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{y}}(t) &= \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \\ \hat{\mathbf{z}}(t) &= \mathbf{K}(\mathbf{x}, \mathbf{y}).\end{aligned}\quad (1)$$

В системе (1)  $\mathbf{y}$  – вектор состояния наблюдателя (первое уравнение),  $\hat{\mathbf{z}}$  – вектор оценок ненаблюдаемых внешних возмущений (второе уравнение).

Асимптотический наблюдатель (1) должен обеспечить:

- ◆ асимптотическую устойчивость замкнутой системы,
- ◆ выполнение технологических инвариантов [2–4],
- ◆ оценку ненаблюдаемых внешних воздействий по текущим значениям ненаблюдаемых координат состояния,
- ◆ поглощение гармонических ветровых возмущений.

Вектором состояния наблюдателя  $\mathbf{y}$  (1) дополняется математическая модель «летающей платформы» в условиях возмущённого движения, а в законах управления ненаблюдаемые переменные заменяются их асимптотическими оценками  $\hat{\mathbf{z}}$  (1) [16].

**Алгоритмы управления верхнего уровня иерархии.** Расширенная математическая модель «летающей платформы» в режиме вертикального движения в условиях внешних гармонических возмущающих воздействий показана ниже:

$$\left\{ \begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{u_1 - mg - C_1 x_1^2 + z_7}{m}, \\ \dot{x}_2 &= \frac{u_2 - C_2 x_2^2 + z_9}{I_x}, \\ \dot{x}_3 &= \frac{u_3 - C_3 x_3^2 + z_{11}}{I_z}, \\ \dot{x}_4 &= x_1, \\ \dot{x}_5 &= x_2, \\ \dot{x}_6 &= x_3, \\ \dot{z}_7 &= a_7 z_8, \\ \dot{z}_8 &= -\left(\frac{\omega_8}{b_8}\right)^2 z_7, \\ \dot{z}_9 &= a_9 z_{10}, \\ \dot{z}_{10} &= -\left(\frac{\omega_{10}}{b_{10}}\right)^2 z_9, \\ \dot{z}_{11} &= a_{11} z_{12}, \\ \dot{z}_{12} &= -\left(\frac{\omega_{12}}{b_{12}}\right)^2 z_{11}.\end{aligned}\right.\quad (2)$$

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,  $x_5 = \mathcal{G}$  – 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 [5].

В модели (2) переменные состояния  $z_7 \dots z_{12}$  – ненаблюдаемые, они представляют собой внешние возмущения, изменяющиеся по гармоническому закону. При этом воздействие, мешающее стабилизации высоты, представлено переменными  $z_7, z_8$ , воздействие, мешающее стабилизации угла тангажа – переменными  $z_9, z_{10}$ , а воздействие, мешающее стабилизации угла крена – переменными  $z_{11}, z_{12}$ . Таким образом, возмущения далее рассматриваются как координаты состояния «Аэромобиля», и именно для этих ненаблюдаемых координат будет выполняться построение асимптотического наблюдателя, имеющего целью оценку возмущающих воздействий по текущим значениям наблюдаемых координат с последующей компенсацией возмущений [3].

Технологическими инвариантами (целями управления) являются [2–4]:

- ◆ стабилизация высоты  $x_4 = x_4^*$ ,
- ◆ стабилизация угла тангажа  $x_5 = x_5^*$ ,
- ◆ стабилизация угла крена  $x_6 = x_6^*$ .

Аналогично статье [4] в соответствии с правилами метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), являющегося основным методом синергетической теории управления [14], синтезируются алгоритмы управления верхнего уровня:

$$\begin{aligned} u_1 &= -m \left( \frac{\Psi_1}{T_1} + \frac{\dot{\Psi}_4}{T_4} \right) + mg + C_1 x_1^2 - z_7, \\ u_2 &= -I_x \left( \frac{\Psi_2}{T_2} + \frac{\dot{\Psi}_5}{T_5} \right) + C_2 x_2^2 - z_9, \\ u_3 &= -I_z \left( \frac{\Psi_3}{T_3} + \frac{\dot{\Psi}_6}{T_6} \right) + C_3 x_3^2 - z_{11}. \end{aligned} \quad (3)$$

Величины, входящие в выражения (3), – это те же самые величины, которые входят в выражения (2) в работе [4].

**Уравнения наблюдателя гармонических возмущений.** Общий вид математической модели произвольной динамической системы может быть представлен так:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}), \\ \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $n$ -вектор  $\mathbf{x}$  и  $m$ -вектор  $\mathbf{z}$  – компоненты вектора состояния,  $\mathbf{u}$  – вектор управления, причём вектор  $\mathbf{x}$  представляется наблюдаемым, а вектор  $\mathbf{z}$  – ненаблюдаемым. Задача состоит в построении асимптотической оценки вектора  $\mathbf{z}$  по наблюдаемым значениям вектора  $\mathbf{x}$  и известному вектору  $\mathbf{u}$  [16].

Частным случаем системы (4) является такой случай, когда векторы  $\mathbf{G}$  и  $\mathbf{H}$  – это линейные функции вектора  $\mathbf{z}$ :

$$\begin{aligned}\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) &= \mathbf{G}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{G}_1(\mathbf{x})\mathbf{z}, \\ \mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) &= \mathbf{H}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{H}_1(\mathbf{x})\mathbf{z}.\end{aligned}\quad (5)$$

В соответствии с формулами (4, 5) обобщённая форма модели (2) может быть представлена так:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{G}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{G}_1(\mathbf{x})\mathbf{z}, \\ \dot{\mathbf{z}}(t) &= \mathbf{H}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{H}_1(\mathbf{x})\mathbf{z}.\end{aligned}\quad (6)$$

Критерий наблюдаемости для динамической системы (6):

$$\text{rank}\left(\mathbf{G}_1^T(\mathbf{x}) \quad \mathbf{H}_1^T(\mathbf{x})\mathbf{G}_1^T(\mathbf{x}) \quad \dots \quad (\mathbf{H}_1^T(\mathbf{x}))^5 \mathbf{G}_1^T(\mathbf{x})\right) = 6. \quad (7)$$

Поскольку критерий (7) выполняется, т.е. ранг матрицы управляемости равен порядку динамической системы (6), то общая форма уравнений наблюдателя и оценок ненаблюдаемых переменных (1) – следующая [16]:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{y}} &= \mathbf{L}\mathbf{y} - \mathbf{L} \int_0^{\mathbf{x}} \Gamma(\mathbf{x})d\mathbf{x} - \mathbf{H}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \Gamma(\mathbf{x})\mathbf{G}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \\ \hat{\mathbf{z}} &= \int_0^{\mathbf{x}} \Gamma(\mathbf{x})d\mathbf{x} - \mathbf{y}.\end{aligned}\quad (8)$$

В уравнениях (8) матрица  $\mathbf{L}$  может быть задана произвольно. Допустимым её вариантом представляется диагональная матрица, на главной диагонали которой находятся числа  $l_i$ ,  $i = \overline{1, 6}$ .

Вычисление матрицы  $\Gamma$  производится на основе уравнения:

$$\mathbf{H}_1(\mathbf{x}) - \mathbf{L} = \Gamma(\mathbf{x}) \times \mathbf{G}_1(\mathbf{x}). \quad (9)$$

Результат расчёта по выражению (9) подставляется в (8). Полученные уравнения наблюдателя – первое уравнение в системе (1):

$$\begin{aligned}\dot{y}_1 &= l_1 \left( y_1 + l_1 m x_1 - (u_1 - mg - C_1 x_1^2) \right), \\ \dot{y}_2 &= l_2 \left( y_2 + \left( \frac{\omega_8}{b_8} \right)^2 m x_1 \right) - \left( \frac{\omega_8}{b_8} \right)^2 (u_1 - mg - C_1 x_1^2), \\ \dot{y}_3 &= l_3 \left( y_3 + l_3 m x_2 - (u_2 - C_2 x_2^2) \right), \\ \dot{y}_4 &= l_4 \left( y_4 + \left( \frac{\omega_{10}}{b_{10}} \right)^2 I_x x_2 \right) - \left( \frac{\omega_{10}}{b_{10}} \right)^2 (u_2 - C_2 x_2^2), \\ \dot{y}_5 &= l_5 \left( y_5 + l_5 m x_3 - (u_3 - C_3 x_3^2) \right), \\ \dot{y}_6 &= l_6 \left( y_6 + \left( \frac{\omega_{12}}{b_{12}} \right)^2 I_z x_3 \right) - \left( \frac{\omega_{12}}{b_{12}} \right)^2 (u_3 - C_3 x_3^2).\end{aligned}\quad (10)$$

Полученные уравнения для оценок ненаблюдаемых переменных – второе уравнение в системе (1):

$$\begin{aligned}\hat{z}_7 &= -l_1 m x_1 - y_1, \\ \hat{z}_8 &= -\left( \omega_8 / b_8 \right)^2 m x_1 - y_2, \\ \hat{z}_9 &= -l_3 I_x x_2 - y_3, \\ \hat{z}_{10} &= -\left( \omega_{10} / b_{10} \right)^2 I_x x_2 - y_4, \\ \hat{z}_{11} &= -l_5 I_z x_3 - y_5, \\ \hat{z}_{12} &= -\left( \omega_{12} / b_{12} \right)^2 I_z x_3 - y_6.\end{aligned}\quad (11)$$

Далее законы управления (3) с подстановкой в них равенств (11), пройдя через уравнения связи среднего уровня иерархии, поступают в качестве задающих воздействий на нижний уровень иерархии, под влиянием чего система синхронизации электродвигателей «летающей платформы» подстраивается под внешние возмущения для их компенсации, реализуя при этом энергосберегающее управление двигателями аппарата [19, 20].

**Моделирование динамики разработанной системы.** Графики моделирования «летающей платформы» в условиях внешних гармонических возмущений без асимптотического наблюдателя показаны ниже на рис. 1–6, а с асимптотическим наблюдателем (1, 8, 10, 11) – на рис. 7–16. По сравнению с работой [3] в данной публикации применена уточнённая математическая модель летательного аппарата с учётом всех нелинейностей, присущих реальному объекту, благодаря чему повысилась качество синтеза и моделирования.

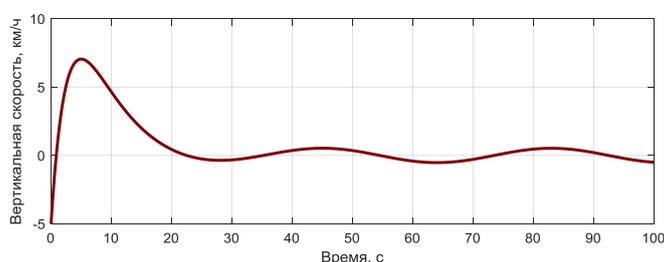


Рис. 1. График изменения вертикальной скорости (верхний уровень иерархии, без наблюдателя возмущений)

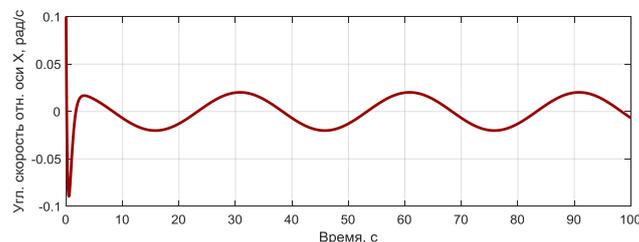


Рис. 2. График изменения угловой скорости относительно продольной оси (верхний уровень иерархии, без наблюдателя возмущений)

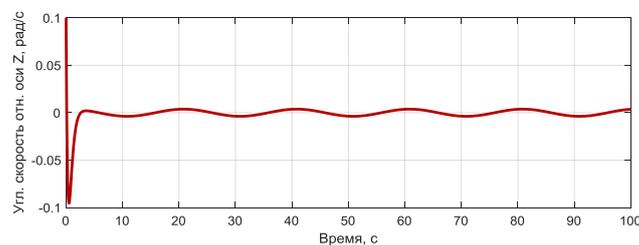


Рис. 3. График изменения угловой скорости относительно боковой оси (верхний уровень иерархии, без наблюдателя возмущений)

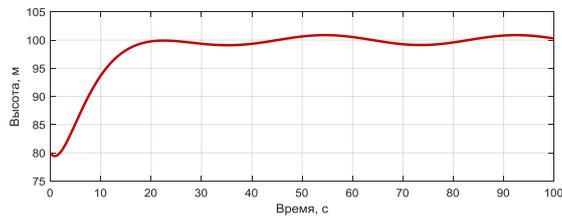


Рис. 4. График изменения высоты (верхний уровень иерархии, без наблюдателя возмущений)

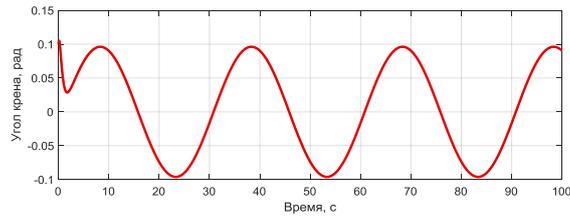


Рис. 5. График изменения угла крена (верхний уровень иерархии, без наблюдателя возмущений)

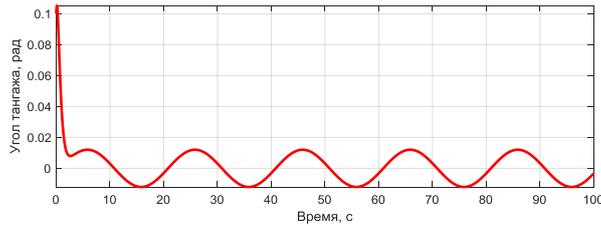


Рис. 6. График изменения угла тангажа (верхний уровень иерархии, без наблюдателя возмущений)

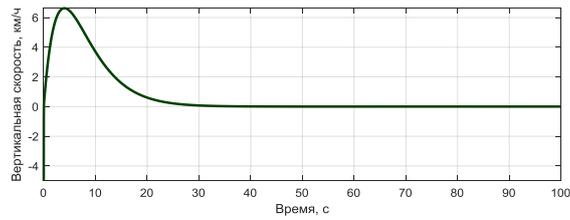


Рис. 7. График изменения вертикальной скорости (верхний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

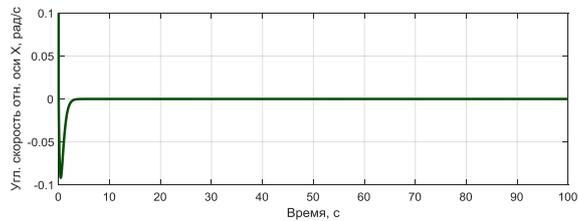


Рис. 8. График изменения угловой скорости относительно продольной оси (верхний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

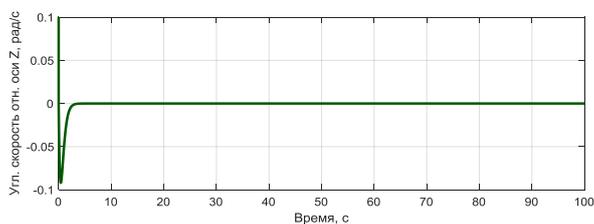


Рис. 9. График изменения угловой скорости относительно боковой оси (верхний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

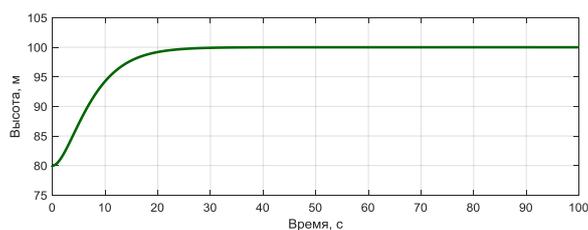


Рис. 10. График изменения высоты (верхний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

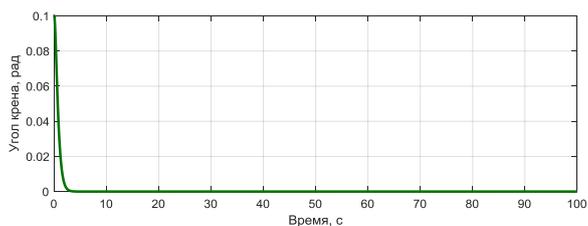


Рис. 11. График изменения угла крена (верхний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

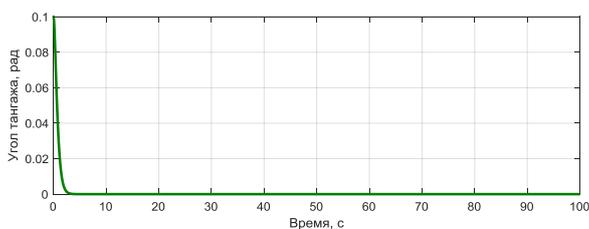


Рис. 12. График изменения угла тангажа (верхний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

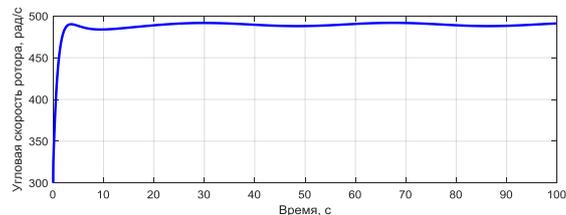


Рис. 13. График изменения угловой скорости ротора (нижний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

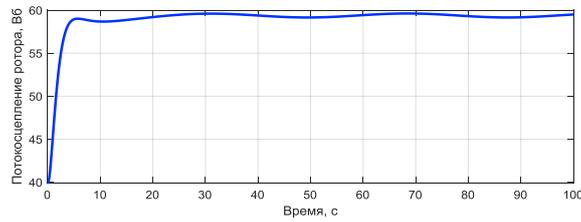


Рис. 14. График изменения потокосцепления ротора (нижний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

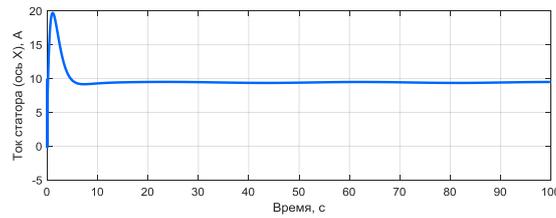


Рис. 15. График изменения проекции тока статора на ось абсцисс (нижний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

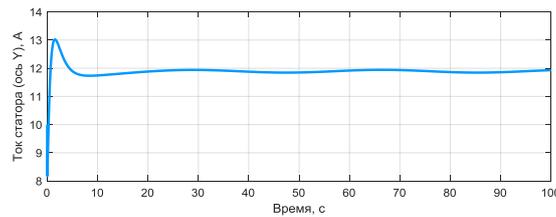


Рис. 16. График изменения проекции тока статора на ось ординат (нижний уровень иерархии, с наблюдателем возмущений)

Рис. 13–16 относятся к одному из двигателей; для остальных трёх двигателей графики моделирования аналогичны. Как видно из сравнения рис. 1–6 и рис. 7–12, асимптотический наблюдатель эффективно поглощает внешние гармонические возмущения.

**Выводы.** В данной работе рассчитан асимптотический наблюдатель гармонических возмущающих воздействий для «летающей платформы» и проведено компьютерное моделирование нелинейной динамики аппарата в условиях внешних возмущений. Асимптотический наблюдатель, эффективно подавляя возмущения, гарантирует невосприимчивость «летающей платформы» к отрицательному влиянию этих возмущений на траекторию полёта, асимптотическую устойчивость замкнутой системы и соблюдение принципов энергосберегающего управления силовыми установками. Результаты работы будут полезны при разработке новых типов пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, не использующих аэродинамические поверхности для создания подъёмной силы, например, квадрокоптеров, для обеспечения их бесперебойного функционирования в условиях значительных ветровых и прочих воздействий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. РФ №2348568. Лёгкий многорежимный летательный аппарат / Ю.С. Воронков, О.Ю. Воронков; Опубл. 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 «Аэромобилия» с асимптотическим наблюдателем гармонических возмущений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 6 (119). – С. 153-161.
4. *Воронков О.Ю.* Синергетический подход к синтезу системы управления «летающей платформой» // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 3 (2019). – С. 161-170.
5. *Курочкин Ф.П.* Основы проектирования самолётов с вертикальным взлётом и посадкой. – М.: Машиностроение, 1970. – 354 с.
6. *Шайдаков В.И.* Аэродинамика винта в кольце. – М.: Изд-во Московского Авиационного Института, 1996. – 88 с.
7. *Буков В.Н.* Адаптивные прогнозирующие системы управления полётом. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 232 с.
8. *Lambregts A.A.* Vertical flight path and speed control autopilot using total energy principles // AIAA P1983. № 2239CP.
9. *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.
10. *Tsourdos A., White B.A.* Adaptive flight control design for nonlinear missile // Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02). – Barcelona, 2002.
11. *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.
12. *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.
13. *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.
14. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – Таганрог: ТРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
15. Современная прикладная теория управления. Ч. I: Оптимизационный подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.
16. Современная прикладная теория управления. Ч. II: Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 559 с.
17. Современная прикладная теория управления. Ч. III: Новые классы регуляторов технических систем / под ред. А.А. Колесникова. – М. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 656 с.
18. *Колесников А.А., Мушенко А.С.* Синергетическое управление процессами пространственного движения летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 2. – С. 38-45.
19. *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.
20. *Попов А.Н.* Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. – 67 с.

## REFERENCES

1. *Voronkov Yu.S., Voronkov O.Yu.* Patent RF No. 2348568. Legkiy mnogorezhimnyy letatel'nyy apparat [Easy multi-mode aircraft]; Published 10.03.09. Bull. No. 7.
2. *Voronkov O.Yu.* Sinergeticheskiy sintez ierarkhicheskoy sistemy upravleniya «Aeromobil» v rezhime balansirovki [Synergetic synthesis of the hierarchical control system "Aeromobil" in balancing mode], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 5 (118), pp. 55-60.

3. *Voronkov O.Yu.* Sinergeticheskiy sintez ierarkhicheskoy sistemy balansirovki «Aeromobilya» s asimptoticheskim nablyudatelem garmonicheskikh vozmushcheniy [Synergetic synthesis of the hierarchical balancing system "Aeromobil" with an asymptotic observer of harmonic perturbations], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 6 (119), pp. 153-161.
4. *Voronkov O.Yu.* Sinergeticheskiy podkhod k sintezu sistemy upravleniya «letayushchey platformoy» [A synergistic approach to the synthesis of a control system of "flying platform"], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 3 (2019), pp. 161-170.
5. *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.
6. *Shaydakov V.I.* Aerodinamika vinta v kol'tse [Aerodynamics of the screw in the ring]. Moscow: Izd-vo Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta, 1996, 88 p.
7. *Bukov V.N.* Adaptivnye prognoziruyushchie sistemy upravleniya poletom [Adaptive predictive flight control systems]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1987, 232 p.
8. *Lambregts A.A.* Vertical flight path and speed control autopilot using total energy principles, *AIAA P1983*. No. 2239CP.
9. *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.
10. *Tsourdos A., White B.A.* Adaptive flight control design for nonlinear missile, *Proc. 15th Triennial World Congr. of IFAC (b'02)*. Barcelona, 2002.
11. *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.
12. *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.
13. *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.
14. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. Taganrog: TRTU, M.: Energoatomizdat, 1994, 344 p.
15. *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.
16. *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.
17. *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.
18. *Kolesnikov A.A., Mushenko A.S.* Sinergeticheskoe upravlenie protsessami prostranstvennogo dvizheniya letatel'nykh apparatov [Synergetic control of processes of spatial movement of aircraft], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2004, No. 2, pp. 38-45.
19. *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.
20. *Popov A.N.* Sinergeticheskiy sintez zakonov energosberegayushchego upravleniya elektromekhanicheskimi sistemami [Synergetic synthesis of laws of energy-saving management of Electromechanical systems]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2003, 67 p.

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

**Воронков Олег Юрьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: ovoronkov@sfnu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +79508449549; кафедра синергетики и процессов управления; к.т.н.; ассистент.

**Voronkov Oleg Yurievich** – Southern Federal University; e-mail: ovoronkov@sfnu.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79508449549; the department of synergetics & control processes; cand. of eng. sc.; assistant.