

19. Melnik E., Klimenko A., Klimenko V. A recovery technique for the fog-computing-based information and control systems, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, Vol. 860, pp. 216-227.
20. Melnik E.V., Klimenko A.B. A workload distribution problem model and online constraint forming technique for the control systems in the fog-computing environment, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Vol. 1333, pp. 042014. Doi: 10.1088/1742-6596/1333/4/042014.
21. Melen'tev V.A. Analiticheskiy podkhod k sintezu regul'yarnykh grafov s zadannymi znacheniyami poryadka, stepeni i obkhvata [Analytical approach to the synthesis of regular graphs with given values of order, degree, and girth], *Prikladnaya diskretnaya matematika* [Applied Discrete Mathematics], 2010, No. 2 (8), pp. 74-86.
22. Muntyan E.R., Melnik E.V. The graph-based analysis of structural delays in distributed multiprogram systems of information processing, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1661 (1). Doi: 10.1088/1742-6596/1661/1/012061.
23. Muntyan E.R. Programmnyy modul' dlya predstavleniya aktorov i otnosheniy mezhdru aktorami na osnove grafov. Svid. o gos. reg. programmy dlya EVM № 2018665499, zareg. 05.12.2018 [Certificate of official registration of a computer program No. 2018665499, "A software module for representing actors and relationships between actors based on graphs", registered 05.12.2018]. Moscow: Rospatent, 2018.
24. Muntyan E.R. Razrabotka i issledovanie modeley grafov i gipergrafov s uchetom mnozhestvennykh i raznotipnykh svyazey: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Development and research of models of graphs and hypergraphs taking into account multiple and different types of edges: cand. of eng. sc. diss.] (05.13.17). Taganrog: YuFU, 2020, 20 p.
25. Kolodenkova A.E. and Muntyan E.R. Researches of interaction of actors with use fuzzy hypergraph and cognitive modeling, *Papers in English 14th International scientific-technical conference on actual problems of electronics instrument engineering: IEEE, 2018*, Vol. 8, pp. 127-131. Doi: 10.1109/APEIE.2018.8545550.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Г. Коробейников.

Мунтян Евгения Ростиславна – Южный федеральный университет; e-mail: ermuntyan@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371608; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Мельник Эдуард Всеволодович – Южный научный центр РАН; г. Ростов-на-Дону, Россия; д.т.н.; г.н.с.

Muntyan Evgenia Rostislavna – Southern Federal University; e-mail: ermuntyan@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371608; the department of computer science; cand. of eng. sc.; associate professor.

Melnik Eduard Vsevolodovich – Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; Rostov-on-Don, Russia; dr. of eng. sc.; chief researcher.

УДК 629.735.4

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-198-209

О.Ю. Воронков

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АСТАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМОЙ»

Работа посвящена синергетическому синтезу астатического гарантирующего регулятора для иерархической системы управления летательным аппаратом. Статья содержит общее описание вертикально взлетающего аппарата типа «летающая платформа» и астатического гарантирующего регулятора на основе интеграторов. Астатический регулятор должен обеспечить асимптотическую устойчивость замкнутой системы, выполнение технологических инвариантов, оценку неизмеряемых внешних воздействий по текущим значениям измеряемых координат состояния и парирование кусочно-постоянных внешних

возмущений (например, ветровых), приводящих к случайным изменениям высоты полёта, углов тангажа и крена. Также в статье приведена расширенная математическая модель «летающей платформы» в режиме вертикального движения в условиях внешних кусочно-постоянных возмущающих воздействий, включающая уравнения оценок возмущений, и на основе заданных технологических инвариантов синтезированы алгоритмы управления верхнего уровня иерархии. Кроме этого, приведены уравнения интеграторов, которые обязаны входить в состав астатического регулятора и связаны с уравнениями оценок возмущающих воздействий. В рамках синергетической теории управления интеграторы не приводят к ухудшению устойчивости замкнутой системы, потому что метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов гарантирует асимптотическую устойчивость динамической системы. Наконец, показаны результаты компьютерного моделирования нелинейной динамики верхнего и нижнего уровней иерархии в условиях возмущённого движения с парированием внешних возмущений интеграторами астатического регулятора, а также результаты компьютерного моделирования нелинейной динамики аппарата в условиях возмущённого движения без этого регулятора для возможности наглядной оценки качества работы регулятора 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 астатическим гарантирующим регулятором для парирования возмущающих воздействий.

«Летающая платформа»; вентилятор в кольце; синергетическая теория управления; наихудшие возмущения; астатический гарантирующий регулятор.

O.Yu. Voronkov

SYNERGETIC SYNTHESIS OF AN ASTATIC CONTROLLER FOR THE “FLYING PLATFORM” CONTROL SYSTEM

The work is devoted to the synergetic synthesis of the astatic guaranteeing controller for the aircraft hierarchical control system. The paper contains the general description of “flying platform” type vertical take-off & landing aircraft & an integrator-based astatic guaranteeing controller. An astatic controller must ensure the asymptotic stability of a reserved system, the implementation of technological invariants, the estimation of immeasurable external influences from the current values of the measurable state-space variables, & the parry of piecewise constant external disturbances (for example, wind) that cause random changes in flight height, in pitch & in roll angles. The article also presents an extended mathematical model of the “flying platform” in the vertical movement mode under external piecewise constant disturbing influences, including disturbance estimation equations, & the upper hierarchy level control algorithms based on the given technological invariants are synthesized. In addition, the integrators’ equations are given; such must be included into the astatic controller & are related to the equations of disturbing influences estimates. In the framework of synergetic control theory, integrators don’t lead to worst stability of a closed-loop system because the method of aggregated controllers’ analytical design guarantees the dynamic system asymptotic stability. Finally, the results of computer simulation of the upper & the lower hierarchy levels’ nonlinear dynamics under disturbed motion with parry of external disturbances by astatic controller integrators are shown, as well as the results of computer simulation of the vehicle’s nonlinear dynamics under disturbed motion without this controller to allow a visual assessment of the controller’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 astatic guaranteeing controller to parry disturbing influences.

“Flying platform”; fan in the ring; synergetic control theory; worst disturbance; astatic guaranteeing controller.

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 имени профессора А.А. Колесникова Южного федерального университета [14–17].

Астатические гарантирующие регуляторы. В работах [3, 4] был выполнен синергетический синтез иерархической [18] системы балансировки пространственного положения «летающей платформы» с применением асимптотического наблюдателя гармонических внешних возмущающих воздействий. Однако метод наблюдения ветровых возмущений не в состоянии предусмотреть всех возможных воздействий, а в процессе синтеза наблюдателя требуются математические модели возмущающих воздействий. Так, для гармонических возмущений требуется информация о частоте колебаний, которую на практике часто бывает затруднительно получить. Уместно отметить, что с течением времени характер и параметры внешних воздействий могут претерпевать значительные изменения. Причина этого заключена в неоднородности воздушной среды и непостоянстве ветрового потока.

Метод наблюдения координат, представленный в работах [3, 4], в принципе, допускает идентификацию внешних воздействий в реальном времени. Однако здесь возникает ряд технических трудностей: динамическая модель объекта управления должна быть очень точной, а быстродействие наблюдателя – существенно превосходить скорость изменения возмущений. Кроме этого, может потребоваться наблюдение всех параметров и координат состояния объекта. В результате законы управления значительно усложняются, и эффективность асимптотического наблюдателя на практике ощутимо падает.

Таким образом, возникает необходимость построения *гарантирующих регуляторов* [19] верхнего уровня иерархии для «летающей платформы». Такие регуляторы с технической точки зрения представляются довольно простыми и реализуют парирование *наихудших внешних возмущений*.

Наихудшие внешние возмущения. Определение наихудших воздействий предлагается заимствовать из работы [20]: *«наихудшие – это такие внешние возмущения, которые за наименьшее время отклоняют объект управления на максимальное возможное расстояние от желаемого состояния в его фазовом пространстве»*. Из такого определения, в соответствии с принципом максимума Понтрягина, следует математическое описание наихудших возмущений как кусочно-постоянных воздействий вида:

$$M_{\text{sup}} = M_i \text{sign } \mu(t). \quad (1)$$

Изменения величины M_i и знака функции $\mu(t)$ в выражении (1) являются случайными.

Гарантирующий регулятор обязан включать в себя *интеграторы*, а получаемые управляющие алгоритмы представляются *астатическими* и на практике легко реализуемыми. Интегральные компоненты, хотя повышают точность управления и подавляют возмущения, тем не менее, ухудшают устойчивость замкнутой системы. Для многосвязных систем с ПИ-элементами в отдельных каналах управления проблема устойчивости встает особенно остро; однако в рамках метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), являющегося основным методом синергетической теории управления, подобных сложностей нет, поскольку этот подход гарантирует асимптотическую устойчивость динамической системы [14–17].

Алгоритмы управления верхнего уровня иерархии. Чтобы провести процедуру парирования кусочно-постоянных ветровых воздействий, требуется дополнить исходную [2] математическую модель аппарата уравнениями *оценок* возмущений, при составлении которых учитывались *технологические инварианты* [2]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{u_1 - mg - C_1 x_1^2 + z_7}{m}, \\ \dot{x}_2 &= \frac{u_2 - C_2 x_2^2 + z_8}{I_x}, \\ \dot{x}_3 &= \frac{u_3 - C_3 x_3^2 + z_9}{I_z}, \\ \dot{x}_4 &= x_1, \\ \dot{x}_5 &= x_2, \\ \dot{x}_6 &= x_3, \\ \dot{z}_7 &= \eta_7 (x_4 - x_4^*), \\ \dot{z}_8 &= \eta_8 (x_5 - x_5^*), \\ \dot{z}_9 &= \eta_9 (x_6 - x_6^*). \end{aligned} \tag{2}$$

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 уравнениях (2) η_7, η_8, η_9 – постоянные коэффициенты, z_7, z_8, z_9 – оценки возмущающих воздействий.

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 АКАР синтезируются алгоритмы управления верхнего уровня:

$$\begin{aligned} u_1 &= m \left(-\frac{\Psi_1}{T_1} + \dot{\phi}_1 \right) + mg + C_1 x_1^2 - z_7, \\ u_2 &= I_x \left(-\frac{\Psi_2}{T_2} + \dot{\phi}_2 \right) + C_2 x_2^2 - z_8, \\ u_3 &= I_z \left(-\frac{\Psi_3}{T_3} + \dot{\phi}_3 \right) + C_3 x_3^2 - z_9. \end{aligned} \quad (3)$$

В этих формулах используются следующие величины.

Агрегированные макропеременные Ψ_i , $i = \overline{1, 3}$:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= x_1 - \phi_1, \\ \Psi_2 &= x_2 - \phi_2, \\ \Psi_3 &= x_3 - \phi_3. \end{aligned} \quad (4)$$

Внутренние управления:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= -\mu_7 \eta_7 (x_4 - x_4^*) - \frac{\Psi_4}{T_4}, \\ \phi_2 &= -\mu_8 \eta_8 (x_5 - x_5^*) - \frac{\Psi_5}{T_5}, \\ \phi_3 &= -\mu_9 \eta_9 (x_6 - x_6^*) - \frac{\Psi_6}{T_6}. \end{aligned} \quad (5)$$

Производные внутренних управлений:

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_1 &= -\mu_7 \eta_7 x_1 - \frac{\dot{\Psi}_4}{T_4}, \\ \dot{\phi}_2 &= -\mu_8 \eta_8 x_2 - \frac{\dot{\Psi}_5}{T_5}, \\ \dot{\phi}_3 &= -\mu_9 \eta_9 x_3 - \frac{\dot{\Psi}_6}{T_6}. \end{aligned} \quad (6)$$

Агрегированные макропеременные Ψ_i , $i = \overline{4, 6}$:

$$\begin{aligned} \Psi_4 &= x_4 - x_4^* + \mu_7 z_7 = 0, \\ \Psi_5 &= x_5 - x_5^* + \mu_8 z_8 = 0, \\ \Psi_6 &= x_6 - x_6^* + \mu_9 z_9 = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Производные агрегированных макропеременных Ψ_i , $i = \overline{4, 6}$:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_4 &= \dot{x}_4 + \mu_7 \dot{z}_7 = 0, \\ \dot{\Psi}_5 &= \dot{x}_5 + \mu_8 \dot{z}_8 = 0, \\ \dot{\Psi}_6 &= \dot{x}_6 + \mu_9 \dot{z}_9 = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Внутренние переменные регулятора, вычисляемые как интегралы отклонения стабилизируемых переменных от своих желаемых значений:

$$\begin{aligned} z_7 &= \eta_7 \int (x_4 - x_4^*) dt, \\ z_8 &= \eta_8 \int (x_5 - x_5^*) dt, \\ z_9 &= \eta_9 \int (x_6 - x_6^*) dt. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнения оценок возмущений:

$$\begin{aligned} \dot{z}_7 &= -\eta_7 \mu_7 z_7, \\ \dot{z}_8 &= -\eta_8 \mu_8 z_8, \\ \dot{z}_9 &= -\eta_9 \mu_9 z_9. \end{aligned} \quad (10)$$

μ_7, μ_8, μ_9 – параметры интеграторов. В установившемся режиме при условиях $\eta_7 \mu_7 > 0, \eta_8 \mu_8 > 0, \eta_9 \mu_9 > 0$ уравнения (10) являются устойчивыми, что означает выполнение *технологических инвариантов* [2].

Далее законы управления (3) с подстановкой в них равенств (4–10), 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 эффективного парирования, реализуя при этом энергосберегающее управление двигателями аппарата.

Моделирование динамики разработанной системы. Графики моделирования поведения «летающей платформы» в условиях внешних возмущений без регулятора показаны ниже на рис. 1–6, а с астатическим гарантирующим регулятором на основе интеграторов (3–10) – на рис. 7–16. В обоих случаях на «летающую платформу» действуют кусочно-постоянные возмущения (например, сильные порывы ветра), меняющиеся через каждые 100 секунд.

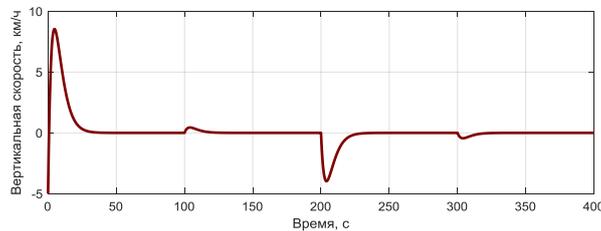


Рис. 1. График изменения вертикальной скорости (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

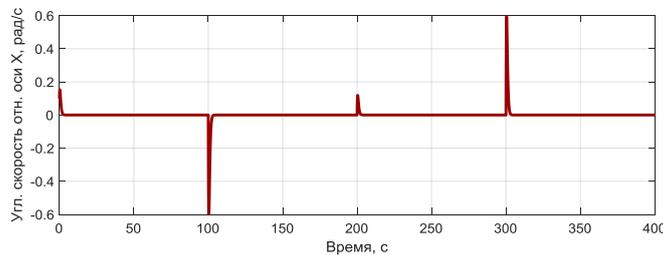


Рис. 2. График изменения угловой скорости относительно продольной оси (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

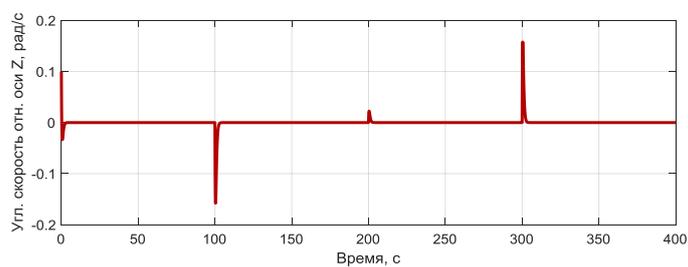


Рис. 3. График изменения угловой скорости относительно боковой оси (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

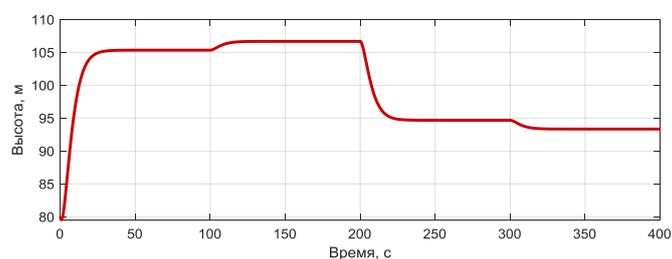


Рис. 4. График изменения высоты (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

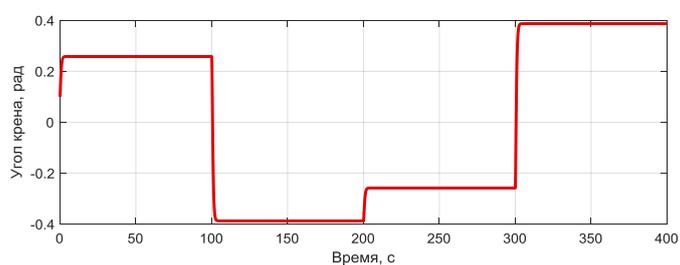


Рис. 5. График изменения угла крена (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

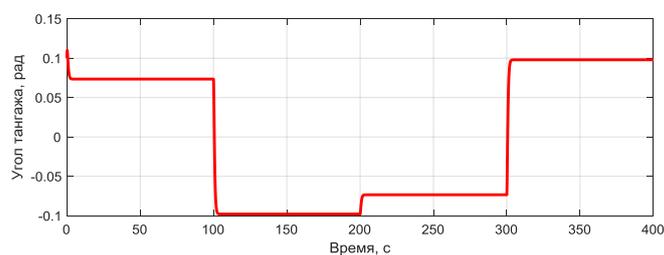


Рис. 6. График изменения угла тангажа (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

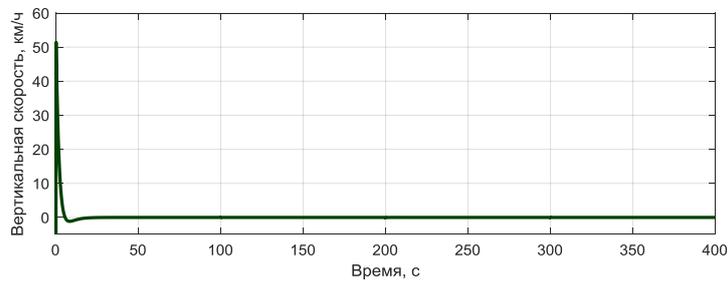


Рис. 7. График изменения вертикальной скорости (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

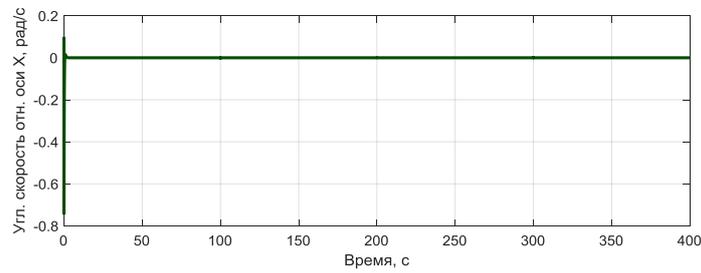


Рис. 8. График изменения угловой скорости относительно продольной оси (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

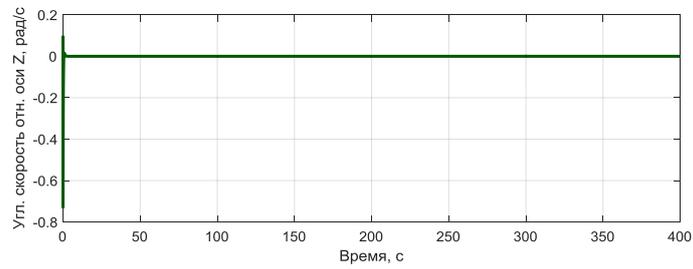


Рис. 9. График изменения угловой скорости относительно боковой оси (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

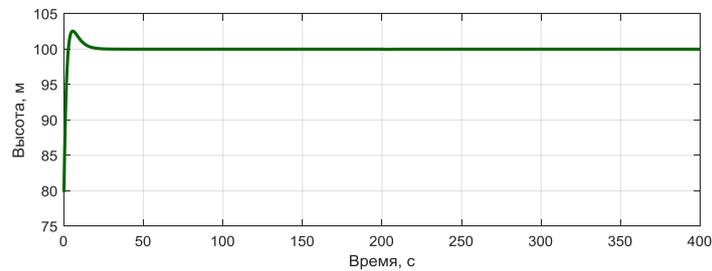


Рис. 10. График изменения высоты (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

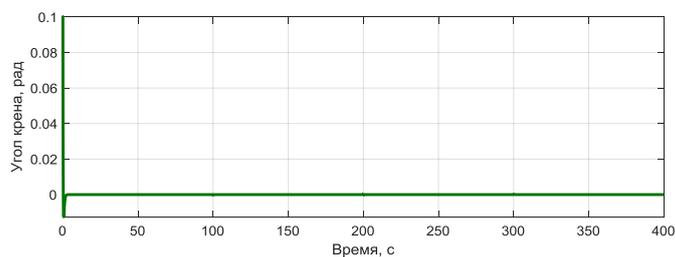


Рис. 11. – График изменения угла крена (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

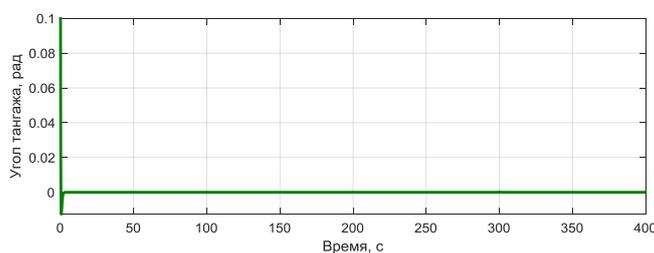


Рис. 12. График изменения угла тангажа (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

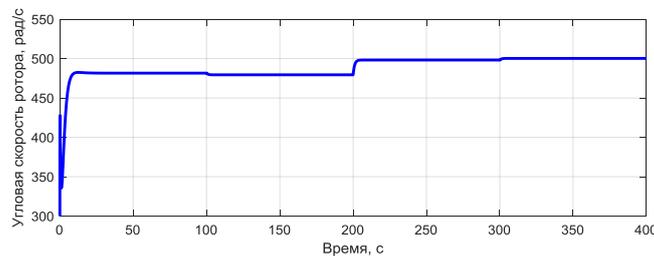


Рис. 13. График изменения угловой скорости ротора (нижний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

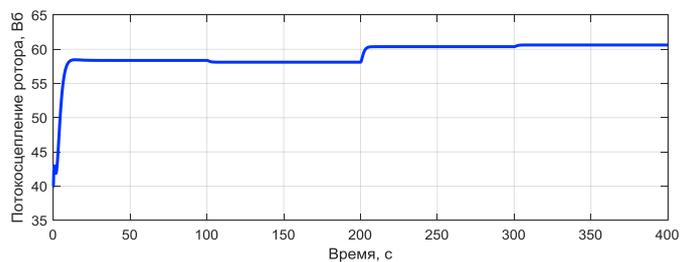


Рис. 14. График изменения потокосцепления ротора (нижний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

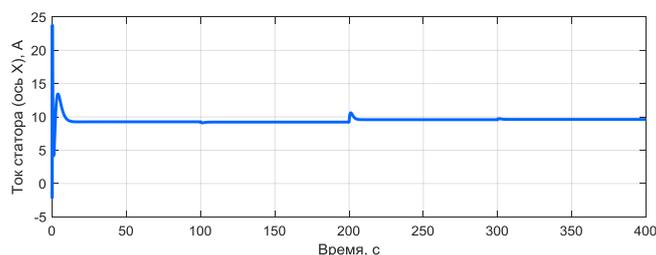


Рис. 15. График изменения проекции тока статора на ось абсцисс (нижний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

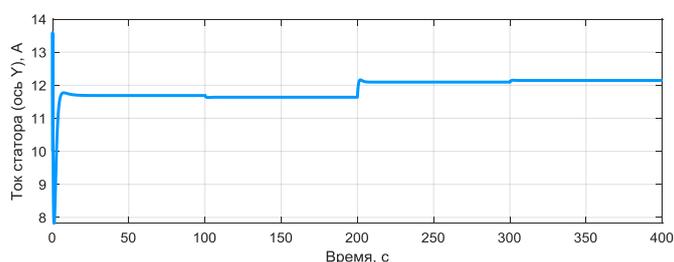


Рис. 16. График изменения проекции тока статора на ось ординат (нижний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

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, наилучшие возмущения эффективно парируются интеграторами астатического регулятора.

Выводы. В данной работе рассчитан астатический гарантирующий регулятор для «летающей платформы» и проведено компьютерное моделирование нелинейной динамики аппарата в условиях внешних возмущений. Интеграторы астатического регулятора, эффективно парируя возмущения, гарантируют 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 / 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. *Воронков О.Ю.* Синергетический синтез наблюдателя возмущений для системы управления «летающей платформой» // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 3 (2020). – С. 29-39.
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. *Абдуллаев Н.Д., Петров Ю.П.* Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. – 240 с.
20. *Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А.* Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерации электроэнергии. – М., 2009. – 323 с.

REFERENCES

1. *Voronkov Yu.S., Voronkov O.Yu.* Legkiy mnogorezhimnyy letatel'nyy apparat [Lightweight multi-mode aircraft]. Patent RF No. 2348568; Publ. 10.03.09. Bull. № 7.
2. *Voronkov O.Yu.* Синергетический синтез иерархической системы управления «Аеромобилем» в режиме балансировки [Synergetic synthesis of the hierarchical control system "Aeromobil" in the balancing mode], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 5 (118), pp. 55-60.
3. *Voronkov O.Yu.* Синергетический синтез иерархической системы балансировки «Аеромобилы» с асимптотическим наблюдателем гармонических возмущений [Synergetic synthesis of the hierarchical balancing system of the "Airmobile" with an asymptotic observer of harmonic disturbances], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 6 (119), pp. 153-161.
4. *Voronkov O.Yu.* Синергетический синтез наблюдателя возмущений для системы управления «летающей платформой» [Synergetic synthesis of a perturbation observer for a "flying platform" control system] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 3 (2020), pp. 29-39.

5. *Kurochkin F.P.* Osnovy proektirovaniya samoletov s vertikal'nym vzletom i posadkoy [Fundamentals of designing aircraft with vertical takeoff and landing]. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 354 p.
6. *Shaydakov V.I.* Aerodinamika vinta v kol'tse [Aerodynamics of a screw in a ring]. Moscow: Izd-vo Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta, 1996, 88 p.
7. *Bukov V.N.* Adaptivnye prognoziryuyushchie 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. № 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 management theory]. Taganrog: TRTU, Moscow: 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 theory of management. Part II: A synergetic approach in the theory of management], 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 the processes of spatial motion of aircraft], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation], 2004, No. 2, pp. 38-45.
19. *Abdullaev N.D., Petrov Yu.P.* Teoriya i metody proektirovaniya optimal'nykh regulyatorov [Theory and methods of designing optimal regulators]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningr. otделение, 1985, 240 p.
20. *Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Kuz'menko A.A.* Novye tekhnologii proektirovaniya sovremennykh sistem upravleniya protsessami generatsii elektroenergii [New technologies for designing modern control systems for electric power generation processes]. Moscow, 2009, 323 p.

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

Воронков Олег Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: ovoronkov@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79508449549; кафедра синергетики и процессов управления им. проф. А.А. Колесникова; к.т.н.; доцент.

Voronkov Oleg Yurievich – Southern Federal University; e-mail: ovoronkov@sfnu.ru; Taganrog, Russia, phone: +79508449549; the department of synergetics & control processes n. a. prof. A.A. Kolesnikov; cand. of eng. sc.; associate professor.