

# Синергетический синтез системы управления «летающей платформой» с астатическим регулятором

Олег Ю. Воронков

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

**Аннотация.** Работа посвящена синергетическому синтезу астатического гарантирующего регулятора для системы управления летательным аппаратом. Доклад содержит общее описание и компьютерное моделирование нелинейной динамики аппарата с парированием внешних возмущений интеграторами астатического регулятора. 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 интеграторами для парирования возмущающих воздействий.

**Ключевые слова:** «летающая платформа»; вентилятор в кольце; синергетическая теория управления; наихудшие возмущения; астатический гарантирующий регулятор

## I. ВСТУПЛЕНИЕ

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 основана на принципах синергетической теории, развиваемой на кафедре синергетики и процессов управления им. проф. А. А. Колесникова Южного федерального университета [7–10].

## II. АСТАТИЧЕСКИЕ ГАРАНТИРУЮЩИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

В работах [3, 4] был выполнен синергетический синтез иерархической 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* [11] верхнего уровня иерархии для «летающей платформы». Такие регуляторы с технической точки зрения представляются довольно простыми и реализуют парирование *наихудших внешних возмущений*.

## III. НАИХУДШИЕ ВНЕШНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Определение наихудших воздействий предлагается заимствовать из работы [12]: «*наихудшие – это такие внешние возмущения, которые за наименьшее время отклоняют объект управления на максимально 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 реализуемы. 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 встаёт особенно остро; однако в рамках метода АКАР подобных сложностей нет, поскольку этот подход гарантирует асимптотическую устойчивость динамической системы [7–10].

#### IV. 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]:

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

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 уравнениях (2)  $\eta_7, \eta_8, \eta_9$  – 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 внутренние переменные регулятора, вычисляемые как интегралы отклонения стабилизируемых переменных от своих желаемых значений:

$$\begin{aligned} z_7 &= \eta_7 \int (x_4 - x_4^*) dt, \\ z_8 &= \eta_8 \int (x_5 - x_5^*) dt, \\ z_9 &= \eta_9 \int (x_6 - x_6^*) dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения оценок возмущений:

$$\begin{aligned} \dot{z}_7 &= -\eta_7 \mu_7 z_7, \quad \dot{z}_8 = -\eta_8 \mu_8 z_8, \\ \dot{z}_9 &= -\eta_9 \mu_9 z_9. \end{aligned} \quad (5)$$

$\mu_7, \mu_8, \mu_9$  – параметры интеграторов. В установившемся режиме при условиях  $\eta_7 \mu_7 > 0, \eta_8 \mu_8 > 0, \eta_9 \mu_9 > 0$  уравнения (5) являются устойчивыми, что означает выполнение технологических инвариантов [2].

Далее законы управления (3) с подстановкой в них равенств (4, 5), 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.

#### V. 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 (3–5) – на рис. 7–16. В обоих случаях на «летающую платформу» действуют кусочно-постоянные возмущения (например, сильные порывы ветра), меняющиеся через каждые 100 секунд.

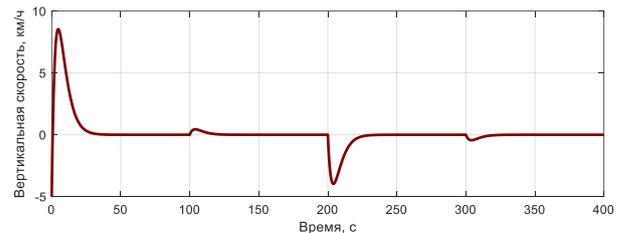


Рис. 1. График изменения вертикальной скорости (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

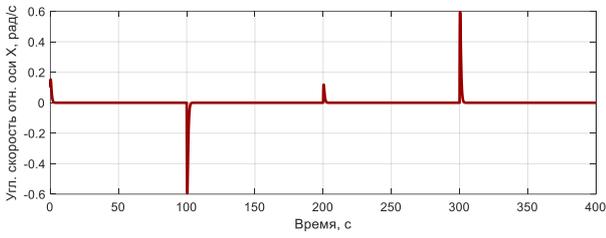


Рис. 2. График изменения угловой скорости относительно продольной оси (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

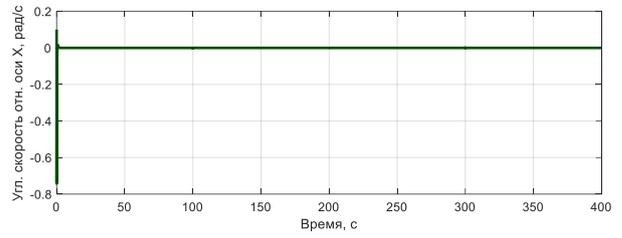


Рис. 8. График изменения угловой скорости относительно продольной оси (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

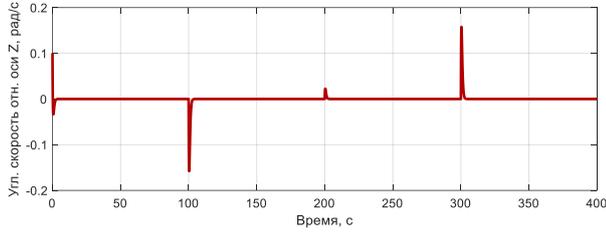


Рис. 3. График изменения угловой скорости относительно боковой оси (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

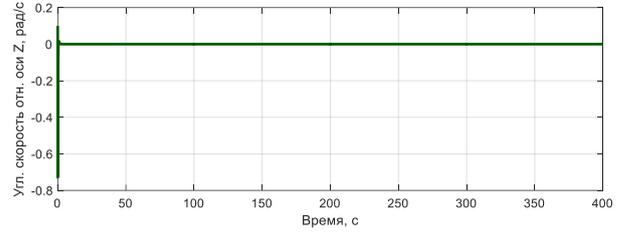


Рис. 9. График изменения угловой скорости относительно боковой оси (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

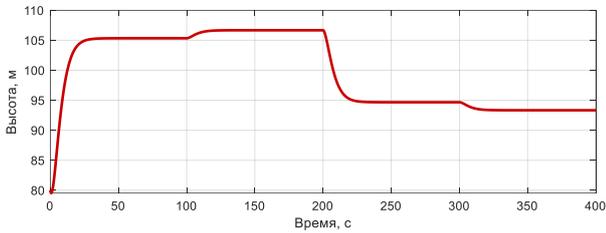


Рис. 4. График изменения высоты (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

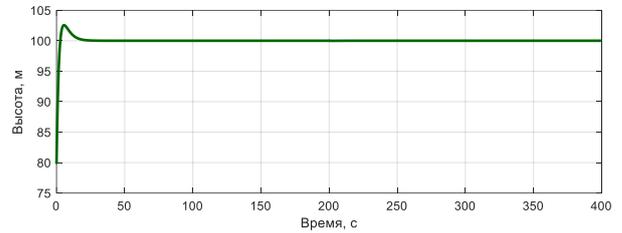


Рис. 10. График изменения высоты (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

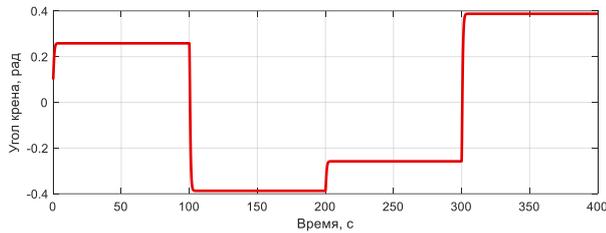


Рис. 5. График изменения угла крена (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

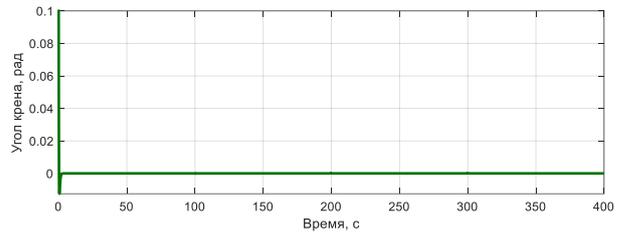


Рис. 11. График изменения угла крена (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

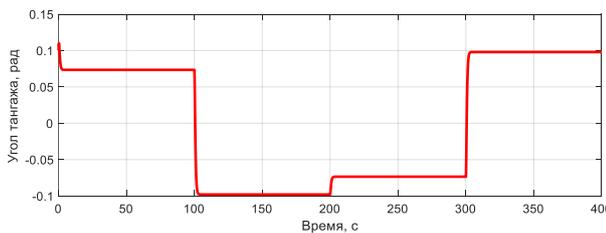


Рис. 6. График изменения угла тангажа (верхний уровень иерархии, без астатического регулятора)

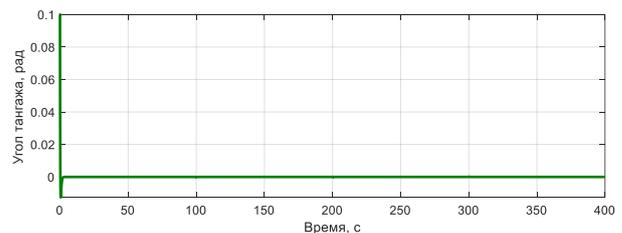


Рис. 12. График изменения угла тангажа (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

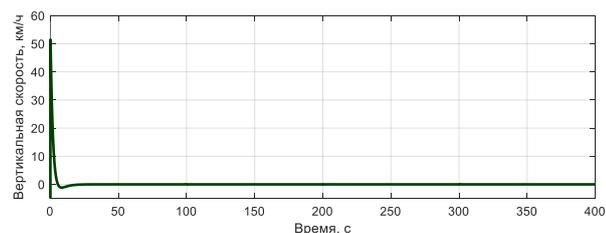


Рис. 7. График изменения вертикальной скорости (верхний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

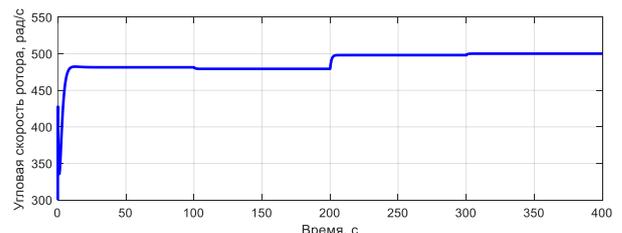


Рис. 13. График изменения угловой скорости ротора (нижний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассчитан астатический гарантирующий регулятор для «летающей платформы» и проведено компьютерное моделирование нелинейной динамики аппарата в условиях парирования наихудших внешних возмущений интеграторами этого регулятора. 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] 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.: Издательство Московского Авиационного Института, 1996. 88 с.
- [7] Колесников А.А. Синергетическая теория управления. Таганрог: ТРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
- [8] Современная прикладная теория управления. Ч.1: Оптимизационный подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. Москва – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 400 с.
- [9] Современная прикладная теория управления. Ч.2: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. Москва – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 559 с.
- [10] Современная прикладная теория управления. Ч.3: Новые классы регуляторов технических систем / Под ред. А.А. Колесникова. Москва – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 656 с.
- [11] Абдуллаев Н.Д., Петров Ю.П. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. 240 с.
- [12] Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерации электроэнергии. М.: 2009. 323 с.

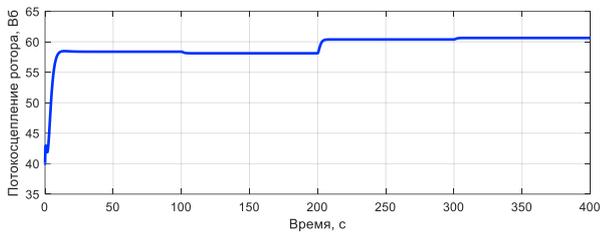


Рис. 14. График изменения потокосцепления ротора (нижний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

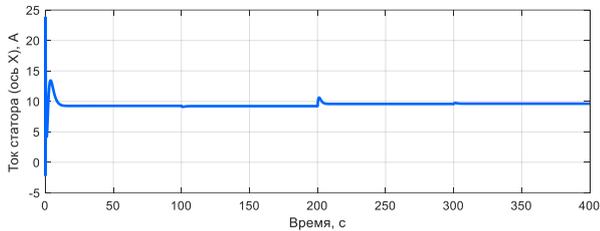


Рис. 15. График изменения проекции тока статора на ось абсцисс (нижний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

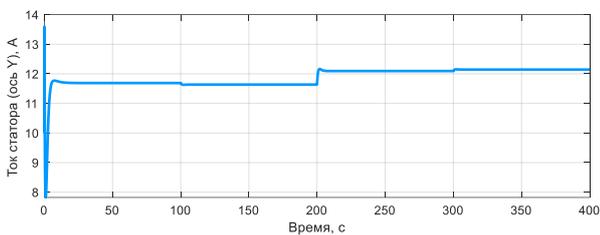


Рис. 16. График изменения проекции тока статора на ось ординат (нижний уровень иерархии, с астатическим регулятором)

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, наихудшие возмущения эффективно парируются интеграторами астатического регулятора.