

# УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ С ОГРАНИЧЕННЫМ ЗАПАСОМ БОРТОВОЙ ЭНЕРГИИ

**А.С. Сыров**

*Московское опытно-конструкторское бюро «МАРС»*  
Россия, 127473, Москва, Щемилковский пер., 16  
E-mail: [office@mars\\_mokb.ru](mailto:office@mars_mokb.ru)

**А.М. Пучков**

*Московское опытно-конструкторское бюро «МАРС»*  
Россия, 127473, Москва, Щемилковский пер., 16  
E-mail: [office@mars\\_mokb.ru](mailto:office@mars_mokb.ru)

**В.Ю. Рутковский**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [rutkov@ipu.ru](mailto:rutkov@ipu.ru)

**В.М. Глумов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [vglum@ipu.ru](mailto:vglum@ipu.ru)

**Ключевые слова:** система управления и угловой стабилизации, беспилотный летательный аппарат, исполнительный орган, привод, дефицит управления.

**Аннотация:** Рассматривается управление аэрокосмическими беспилотными аппаратами при наличии ограниченных энергетических ресурсов исполнительных органов. Используется понятие дефицита управления по уровню и производным возмущающих факторов, анализируются возможности решения проблемы дефицита управления на примере управления боковым угловым движением летательного аппарата.

## 1. Введение

Рассматривается задача высокоточного управления аэродинамическими и аэрокосмическими беспилотными аппаратами (БЛА) с ограниченным энергетическим ресурсом исполнительных органов, что вызывает сложности при выполнении высоких требований, предъявляемых к функционированию систем автоматического управления (САУ) БЛА. Среди проблем, возникающих при решении поставленной задачи, выделяется проблема дефицита управления, свойственная всем БЛА [1]. Дефицит управления обусловлен, во-первых, существенно нелинейными характеристиками и ограниченным энергетическим ресурсом исполнительных устройств САУ; во-вторых, усугублением этого обстоятельства регламентированными разбросами на аэродинамические характе-

ристики БЛА и на характеристики рулевых приводов и большого количества звеньев системы; в-третьих, отказами отдельных элементов управления; в-четвертых, перекрестным влиянием смежных подсистем. При этом необходимо учитывать, что существенное расширение высотно-скоростного диапазона траекторий полета влечет расширение диапазона скоростного напора, массы и других характеристик и параметров БЛА в целом, что определяет нестационарность показателей управляемости БЛА, сужение областей устойчивости и качества управления вкуче с применением БЦВМ, обуславливающих также фактор циклограммных запаздываний. Анализ области применения БЛА формируемая в координатах скорости и высоты полета с нанесением линий скоростного напора, свидетельствует о существенной нестационарности математической модели БЛА по всем параметрам. При синтезе многосвязной системы угловой стабилизации БЛА необходимо решать вопросы формирования основных контуров регулирования; выбора принципов адаптации и реализации алгоритмов и параметров САУ; противоизгибной фильтрации; координированного управления; астатического регулирования и управления; определения роли и места БЦВМ в общей структуре системы; корректной кинематической разводки сигналов аэродинамических рулей; ограничения сигналов управления и параметров координат; обеспечение возможных и допустимых значений выбросов угловых координат и перегрузок; по допустимости и параметрам автоколебаний (по амплитуде и частоте) [1, 2]. Реализация решений указанных задач в первую очередь зависит от степени решения проблемы дефицита управления.

## 2. Проблема дефицита управления

Для управления полетом аэрокосмических БЛА используются две системы исполнительных органов: аэродинамическая и газодинамическая [2, 3]. Эти системы имеют большое число исполнительных устройств и приводов, суммарное максимальное энергопотребление которых превосходит располагаемый энергетический ресурс бортовых источников питания. Необходимо перераспределять ресурсы между исполнительными устройствами и приводами, чтобы обеспечить заданные параметры движения БЛА.

Дефицит управления рассматривается как недостаток располагаемого запаса энергии источника питания для обеспечения суммарного текущего потребления расхода энергии всеми приводами САУ, определяемого заданным режимом полета. Дефицит управления различается:

- по уровню функции управления, когда текущее значение угла отклонения рулевого органа меньше текущего приведенного к рулевому органу уровня возмущения;
- по произвольной функции управления, когда текущее значение скорости отклонения рулевого органа меньше приведенной к рулевому органу скорости изменения возмущения;
- по обеспечению устойчивости в «малом» и в «большом», когда область устойчивости сильно сужается при уменьшении скорости отклонения рулевого органа.

Рассмотрим проблему дефицита управления на примере бокового движения БЛА.

Движение по углу курса  $\psi$  описывается следующими уравнениями

$$(1) \quad \begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_y(t) - M_y^{\omega_y} \omega_y(t) - M_y^{\beta} \beta(t) &= M_y^{\delta_n} \delta_n(t) + M_y^{\beta_w} \beta_w(t) + \varepsilon_{YR}(t), \\ \frac{d}{dt} \psi(t) &= \omega_y(t), \end{aligned}$$

где  $\beta$  – угол скольжения,  $\beta_w$  – ветровой порыв, приведенный к углу скольжения,  $\delta_n$  – угол отклонения органов аэродинамического управления (АДУ) в канале курса,  $\varepsilon_{YR}$  –

компонента управления, формируемая системой газодинамического управления (ГДУ),  $M_y^{\omega_y}$ ,  $M_y^\beta$ ,  $M_y^{\delta_H}$  – динамические коэффициенты БЛА.

В замкнутой САУ по углу курса при формировании сигнала управления  $\sigma_H$  используются измерения координат  $\omega_y$  и боковой перегрузки. Отклонения органов АДУ  $\delta_H$  и уровень компоненты ГДУ  $\varepsilon_{YR}$  являются в первую очередь функциями сигнала управления  $\sigma_H$ . В линейном приближении, без учета динамики исполнительных устройств при  $\delta_H = \sigma_H$ ,  $\varepsilon_{YR} = K_R \sigma_H$  уравнение (1) примет вид

$$(2) \quad \frac{d}{dt} \omega_y(t) - M_y^{\omega_y} \omega_y(t) - M_y^\beta \beta(t) = M_y^{\delta_H} \delta_H(t) + K_R \delta_H(t) + M_y^\beta \beta_w(t),$$

где  $K_R$  – масштабный коэффициент линеаризации характеристики включения управляющего двигателя ГДУ. Введем следующие обозначения в правой части уравнения (2)

$$(3) \quad F_\Sigma(t) = U_{\text{АДУ}}(t) + U_{\text{ГДУ}}(t) - f_w(t),$$

где  $U_{\text{АДУ}}(t) = M_y^{\delta_H} \delta_H(t)$ ,  $U_{\text{ГДУ}}(t) = K_R \delta_H(t)$ ,  $U_\Sigma(t) = U_{\text{АДУ}}(t) + U_{\text{ГДУ}}(t)$ ,  $f_w(t) = M_y^\beta \beta_w(t)$ .

Для идеально функционирующей САУ движением БЛА наиболее «тяжелым» с точки зрения потребного расхода энергии рулевыми приводами является режим управления и угловой стабилизации. Этот режим характеризуется полной компенсацией влияния на БЛА внешних возмущающих воздействий исключительно за счет создания соответствующих управляющих моментов относительно центра масс аппарата либо аэродинамическими рулями, либо управляющими двигателями ГДУ. Математически в (3) этот факт отразится тем, что в идеальном случае (при неограниченном запасе энергии источника питания, неограниченных возможностях рулевых приводов и быстродействующей САУ) суммарное воздействие  $F_\Sigma(t)$  и  $\frac{dF_\Sigma(t)}{dt}$  всегда должны быть больше ну-

ля. Это означает, что САУ «мгновенно» парирует все внешние возмущения. В идеальном случае для (2) при постоянных динамических коэффициентах должно выполняться условие отсутствия дефицита управления

$$(4) \quad U_\Sigma(t) - f_w(t) > 0 \quad \forall t \in [t_0, t_k],$$

где  $t_0, t_k$  – время начала и конца работы САУ соответственно.

Сопоставление составляющих в выражении (3) позволяет выделить зоны дефицита управления, представляющие собой интервалы времени, внутри которых не выполняется условие (4) при суммарном управляющем воздействии или его составляющие при однокомпонентном управлении ( $U_{\text{АДУ}}(t)$  или  $U_{\text{ГДУ}}(t)$ ) по абсолютной величине и по скорости изменения меньше соответственно  $f_w(t)$  и  $\frac{df_w(t)}{dt}$ . На рис. 1 представлены возможные варианты зон дефицита управления при  $F_\Sigma(t)$  вида (3), где обозначены  $A_1, A_2, A_3$  – уровни максимумов функций  $f_w(t), U_{\text{АДУ}}(t), U_{\text{ГДУ}}(t)$ , соответственно.

Для представленных на рис. 1.а видов и соотношений управляющих воздействий и возмущения  $f_w(t)$  отсутствие дефицита управления – выполнение условия (4) – обеспечивается только при смешанном управлении  $U_\Sigma(t)$ . Зоны дефицита управления существуют при  $t > t_1$  для  $U_{\text{ГДУ}}(t)$  и на интервале  $[0, t_2]$  для  $U_{\text{АДУ}}(t)$ . Для представленных на рис. 1.б видов и соотношений управляющих воздействий и возмущения возникает зона дефицита управления на интервале  $[t_3, t_4]$  для  $U_\Sigma(t)$ . Следует отметить, что

компонента  $U_{\text{АДУ}}(t)$  по располагаемому достижимому уровню  $A_2 > A_1$ , но  $\frac{df_w(t)}{dt} > \frac{dU_{\text{АДУ}}(t)}{dt}$ , что является причиной возникновения зон дефицита управления для  $U_{\Sigma}(t)$  и  $U_{\text{АДУ}}(t)$ .

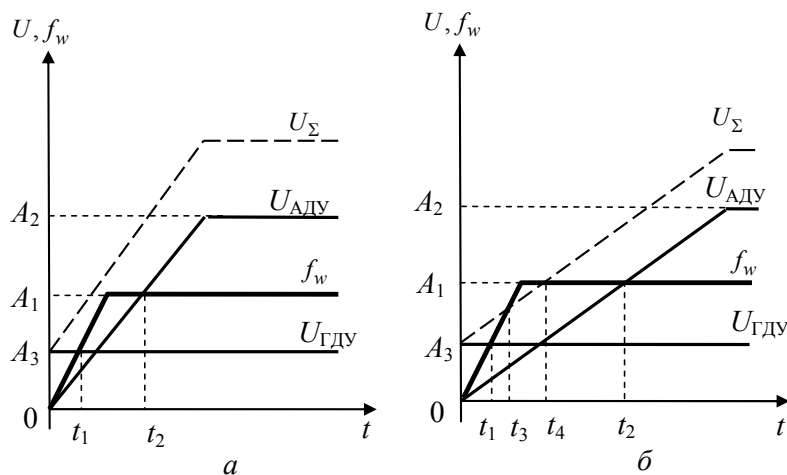


Рис. 1

На основании изложенного сформулируем достаточные условия бездефицитности управления. Для систем с однокомпонентным управлением, в которых управляющие моменты создаются только органами АДУ или ГДУ, функция располагаемого однокомпонентного управления и ее производная по времени должны быть не меньше соответствующих составляющих функций возмущения. В этом случае разность  $\left(\frac{dU_i(t)}{dt} - \frac{df_w(t)}{dt}\right) \geq 0$ , где  $U_i(t) = U_{\text{АДУ}}(t)$  или  $U_i(t) = U_{\text{ГДУ}}(t)$ , обеспечивает  $U_i(t) - f_w(t) \geq 0$  во всем диапазоне времени функционирования системы. Одновременное выполнение этих двух условий гарантирует отсутствие дефицита в режиме однокомпонентного управления БЛА.

Для систем с многокомпонентным управлением, в которых управляющие моменты создаются совместной работой систем АДУ и ГДУ, мгновенное значение функции суммарного располагаемого управления по уровню должна быть не меньше соответствующего мгновенного значения функции возмущения. В этом случае на отдельных интервалах времени допустимо  $\left(\frac{dU_i(t)}{dt} - \frac{df_w(t)}{dt}\right) < 0$  (см. рис.1.а).

Исходя из сформулированных достаточных условий обеспечения бездефицитности управления, целесообразно ввести достаточное условие, определяющее возникновение в системе дефицита управления, когда на отдельных интервала времени полета БЛА располагаемое по уровню значение функции управления меньше соответствующего значения  $f_w(t)$ . Необходимые и достаточные условия бездефицитности управления САУ БЛА находятся между достаточными условиями бездефицитности и достаточными условиями дефицитности управления. В целом, эти управления формируются в рамках конкретной системы с учетом необходимости обеспечения «технической устойчивости», то есть устойчивости БЛА на конечном интервале времени, вне которого его движение может быть и неустойчивым. В основе исследования и решения этого вопро-

са лежит анализ интервала времени, внутри которого в САУ имеется зона дефицита (см. рис. 1.б).

При расчете параметров САУ БЛА необходимо учесть влияние дефицита управления на устойчивость движения БЛА. В качестве примера рассмотрим режим угловой стабилизации в боковом движении БЛА.

На рис. 2 представлена обобщенная область устойчивости, построенная методом D-разбиения, в плоскости коэффициентов передачи  $k_{nz}$  и  $k_{wz}$  обратных связей замкнутого контура управления боковым движением по перегрузке и угловой скорости соответственно. Область устойчивости содержит особую прямую  $B_1B_2$  при  $\omega = 0$  и верхнюю границу  $C_1C_2$  при  $\omega > 0$ . Отрезки  $OB_1$  и  $OB_2$  обратно пропорциональны коэффициентам эффективности органов управления. В линейном приближении («в малом») эти коэффициенты определяются динамическим коэффициентом  $M_y^{\delta_H}$  и коэффициентом  $K_R$ , что позволяет оценить возможности управляющих воздействий и степень влияния дефицита управления на устойчивость.

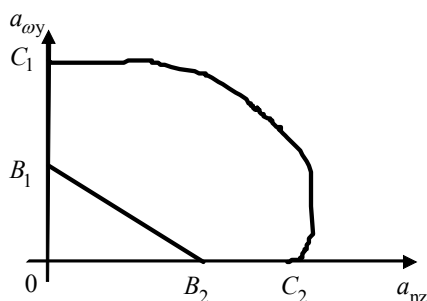


Рис. 2

Для аэродинамических БЛА существенным является вопрос автоколебаний, амплитуду которых целесообразно ограничить не более 1,3-1,6 величины зоны нечувствительности скоростной характеристики рулевого привода с целью наибольшей загрузки управляющими сигналами.

### 3. Заключение

Определение зон дефицита управления целесообразно использовать при формировании управляющих воздействий, что позволяет рационально использовать имеющиеся энергетические ресурсы на борту летательного аппарата.

### Список литературы

1. Сыров А.С., Пучков А.М., Рутковский В.Ю., Глумов В.М. Задачи управления движением многорежимных беспилотных летательных аппаратов // Проблемы управления. 2014. № 4. С. 45-52.
2. Сыров А.С., Рутковский В.Ю., Глумов В.М., Пучков А.М., Соловьев А.С. Особенности синтеза систем управления высокоточными беспилотными летательными аппаратами // Проблемы управления. 2017. № 4. С. 45-52.
3. Glumov V.M., Puchkov A.M., Solovyev A.S. Rational Combination of Aerodynamic and Reaction Controls of a Vehicle // Proceedings of the 14th International Conference "Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems" (Pyatnitskiy's Conference) (STAB-2018, Moscow). Moscow, Russia: IEEE (Catalog Number CFP16E79-ART), 2018. P. 1-3.