



ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МНОГОРЕЖИМНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.С. Сыров, А.М. Пучков, В.Ю. Рутковский, В.М. Глумов

Рассмотрены особенности управления движением современных беспилотных летательных аппаратов, траектории полета которых характеризуются широким диапазоном высот, включая разреженные слои атмосферы. Отмечено, что данный вид летательных аппаратов относится к многорежимным динамическим объектам с изменяющимися в процессе функционирования характеристиками. Представлен краткий обзор методов адаптивного управления, применяемых в системах управления беспилотными летательными аппаратами. Рассмотрены возможности адаптивного управления угловым положением аппарата на режимах планирующего и маршевого движений при сочетании реактивного и аэродинамического способов управления.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, алгоритм управления, системы управления и стабилизации, адаптивное управление, режимы движения, координированное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Спектр современных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) нового поколения, стартующих с объекта-носителя, характерен широкими областями применения по диапазонам высот и скоростей полета, включая и в значительно разреженной атмосфере. Существенными особенностями функционирования системы автоматического управления БПЛА являются организация изменения режимов полета, в том числе при больших по уровню координатных и параметрических возмущениях, а также ужесточение требований к обеспечению высококачественного управления на каждом режиме с целью достижения высокой конечной точности. Для рассматриваемых БПЛА характерны следующие основные режимы полета:

- отделение и отход БПЛА от носителя на безопасное расстояние с набором требуемых значений высоты и скорости полета;
- планирующий и маршевый;
- движение с определенным полетным заданием;
- движение с требуемыми законами изменения углов тангажа, курса и крена в широких диапазонах;

— при достижении на заданном конечном интервале времени требуемых конечных значений высоты, скорости полета, угловых координат и угловых скоростей, завершение с заданной точностью траекторного движения в соответствии с поставленной задачей.

Запуск БПЛА осуществляется с борта носителя, движущегося практически в безвоздушном пространстве. Режим отхода и формирования траекторного движения реализуется с помощью двух типов исполнительных органов: аэродинамических и реактивных, что вызывает необходимость обеспечивать сочетание аэродинамического и реактивного управлений для удовлетворения заданного множества критериев.

Для всех режимов полета БПЛА рассматриваемого класса необходимо решать задачи формирования и реализации системы управления с учетом условий, возникающих в результате внешних воздействий и внутренних возмущений, вызванных технологическими и конструкторскими погрешностями в процессе создания БПЛА.

При синтезе систем автоматического управления и стабилизации (САУС), обеспечивающих высокоточное управление БПЛА на всех режимах полета, применялись известные методы теории адаптивного управления, робастного управления, принципов координатно-параметрического уп-

равления, теории систем с переменной структурой и ряда других. Результаты, полученные в рамках указанных теоретических направлений для ракет рассматриваемого класса БПЛА, представлены главным образом в специальной литературе, сравнительно мало известной широкому кругу специалистов.

К достаточно близким по проблемам управления на различных режимах полета можно отнести решения, реализованные в системе устойчивости и управляемости воздушно-космического самолета «Буран» [1, 2]. В настоящее время существует тенденция восстановления и развития подобных объектов [3].

В современных летательных аппаратах существенно изменилась элементная база бортовых систем, в ее составе увеличилось число цифровых элементов. Большинство БПЛА рассматриваемого класса имеют бортовые цифровые вычислительные машины, что позволяет реализовать более совершенные алгоритмы управления. Алгоритмическая иерархия, структурирование, программное обеспечение САУС многорежимного БПЛА имеют свои особенности. Указанные факторы определяют необходимость дальнейшего развития теоретических и прикладных разработок по управлению ЛА, а также их модернизации посредством применения нестандартных методов решения отдельных задач и проблемы в целом.

Динамика системы управления БПЛА в общем случае описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}\dot{x} &= F_1(x, \delta, w, t), \\ \dot{\delta} &= F_2(\delta, \sigma, t), \\ \dot{\sigma} &= F_3(\sigma, \xi, r, t), \\ \dot{\xi} &= F_4(\xi, x, v),\end{aligned}\quad (1)$$

где x — вектор пространственных и угловых координат БПЛА в инерциальной системе координат, δ — вектор координат исполнительных органов системы управления (приводов аэродинамических рулей и реактивных двигателей), σ — вектор управляющих воздействий, ξ — вектор измеряемых координат на борту БПЛА, r — вектор параметров алгоритма управления, которые изменяются во время полета БПЛА, w — вектор внешних возмущений, действующих на БПЛА, v — вектор шумов измерительных устройств. Нелинейные вектор — функции F_i , $i = \overline{1, 3}$ изменяются во времени вследствие изменения параметров полета. Конкретные виды нелинейных вектор — функ-

ций F_i , $i = \overline{1, 4}$ в уравнениях (1) определяются особенностями аэродинамической компоновки БПЛА и типами функциональных устройств его системы управления. Эти функции достаточно подробно описаны в литературе по системам управления летательных аппаратов [3–6].

Базовый синтез системы управления БПЛА на начальном этапе проводился с помощью линеаризованных уравнений системы (1). При решении задач управления угловым движением и стабилизации углового положения общее угловое движение рассматривалось как сумма трех составляющих: движение по углам рысканья ψ , тангажа ϑ и крена γ [3–6]. Углы ψ , ϑ и γ входят в число компонентов вектора x системы (1). В соответствии с данным разделением формируются три канала управления и стабилизации: курса, тангажа и крена.

Решение задач синтеза и реализации алгоритмов управления рассматриваемого класса БПЛА должно обеспечивать требуемые характеристики движения на различных участках траекторий и режимах полета, а также выполнение:

- устойчивости движения координат системы (1) на всех режимах полета;
- перехода с заданным быстродействием на новый режим движения в условиях действия разнородных возмущений;
- обеспечения допустимой точности по всем угловым координатам БПЛА, которая оценивается по размеру рассогласования между текущим значением координаты и ее заданием.

Указанные требования должны выполняться в условиях возможного дефицита управления, возникающего при действии на объект управления внешних возмущений w , для компенсации которых используются исполнительные устройства, неотъемлемыми свойствами которых являются ограниченные рабочие диапазоны изменения координат исполнительных органов δ и их скоростей $\dot{\delta}$ [7, 8].

Особенность конструкции рассматриваемых в данной работе БПЛА заключается в наличии только двух управляющих поверхностей — аэродинамических рулей, расположенных в горизонтальной плоскости на левой и правой сторонах корпуса аппарата. Вертикальный руль направления отсутствует. Данная особенность вызывает трудности при реализации координированного управления боковым движением БПЛА. Постановка и подробное решение задачи координированного управления БПЛА представлены в работе авторов [9].

В данной работе дается краткий обзор решений некоторых задач по формированию законов управления, в совокупности охватывающих комп-



лекс задач управления и стабилизации, в том числе часто противоречивых, но позволяющих при определенных условиях добиться компромисса в смысле выполнения требований, предъявляемых к системе управления. К числу таких задач, решения которых рассматриваются далее, относятся

- адаптивное управление БПЛА;
- угловая стабилизация БПЛА на режимах планирующего и маршевого движений;
- сочетание аэродинамического и реактивного управлений БПЛА.

1. АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БПЛА

Проектирование БПЛА и синтез его системы управления проводятся с учетом требований, предъявляемых к его динамическим характеристикам, к которым относятся устойчивость движения и качество переходных процессов в системах стабилизации и управления. Широкий диапазон изменения условий полета, связанных с изменением высоты и скорости БПЛА, его массы и центровки, характеристик атмосферы, определяют нестационарность математической модели (1), что может привести к невозможности выполнения задаваемых требований, если система управления и стабилизации БПЛА будет иметь постоянные параметры и структуру. В этом случае проблема выполнения указанных ранее требований решается путем применения в системе управления и стабилизации алгоритмов адаптивного управления [10].

К настоящему времени разработаны способы адаптивного управления летательными аппаратами, методы синтеза адаптивных систем управления и соответствующие устройства для их реализации [3, 10, 11]. Системы управления и стабилизации БПЛА целесообразно проектировать в классе беспоисковых адаптивных систем [10]. При их разработке для рассматриваемого типа БПЛА в зависимости от их конструкции, назначения и других факторов могут использоваться схемы прямого или непрямого адаптивного управления.

В системах прямого адаптивного управления летательных аппаратов используется эталонная модель в виде динамического звена, обладающего заданными динамическими характеристиками. В процессе работы системы оцениваются временные или частотные характеристики модели и системы или ошибка рассогласования движений основного контура системы и эталонной модели. На основании этих данных перестраиваются коэффициенты основного контура так, чтобы свести рассогласования к допустимо малой величине. Примером беспоисковой адаптивной системы БПЛА с эталонной моделью служит система управления

перегрузкой в канале тангажа, подробно описанная в работе [3]. Проведенные исследования и применение этой системы на реальном БПЛА подтвердили возможность существенного улучшения динамических характеристик системы автоматического управления в целом и, в частности, способность адаптивной системы поддерживать требуемые параметры системы в широком диапазоне изменения собственной устойчивости БПЛА из-за изменения его центровки [3].

В работе [12] предложены структура и алгоритмы прямого адаптивного управления с эталонной моделью в канале крена БПЛА. Синтезированный алгоритм адаптации обеспечивает близость движения по координате γ к движению эталонной модели γ_m . Предложенный класс алгоритмов дает системе управления возможность иметь свойства, присущие адаптивным системам [13] и системам с переменной структурой [14]. К таким свойствам относятся высокая точность управления при существенно переменных параметрах объекта, пределы изменения которых достаточно велики, а скорости изменения имеют достаточно большие значения. Вместе с этим рассматриваемые алгоритмы функционируют независимо от уровня неизмеряемых возмущений, интенсивности и спектрального состава управляющих воздействий и при этом обеспечивают высокую точность стабилизации регулируемой координаты.

В адаптивных системах летательных аппаратов большое распространение получила также схема непрямого адаптивного управления. В системах непрямого адаптивного управления производится предварительно идентификация объекта, затем по информации о параметрах объекта вычисляются коэффициенты регулятора. Для БПЛА информация о параметрах его математической модели получается в результате аэродинамических продувок и уточняется в процессе анализа результатов проведения летных экспериментов. Алгоритмы непрямого адаптивного управления БПЛА обеспечивают перестройку параметров алгоритмов управления, передаточных чисел и постоянных времени противоизгибных фильтров по информации о координатах движения. В качестве такой информации используются значения высоты $H(t)$ и скорости $V(t)$ полета (путевой или в числах Маха). В некоторых случаях используется вычисленная заранее функция изменения в процессе полета массы аппарата $m(t)$. Из данных координат могут формироваться параметрические функции: скоростной напор $q(t) = f_1[H(t), V(t)]$ или обобщенная координата $\chi(t) = f_2[H(t), V(t), M(t), m(t)]$, где M — число Маха [10].

Аппаратурная реализация системы управления БПЛА предусматривает применение цифровых и аналоговых устройств. Цифровая часть системы обеспечивает изменение параметров и структуры контуров управления в соответствии с режимом полета и функциями $q(t)$ или $\chi(t)$. Каналы угловой стабилизации полностью или частично реализуются в БПЛА на базе аналоговых устройств. К аналоговой аппаратуре системы управления БПЛА предъявляются высокие требования по допускам, надежности и безотказной работе.

Кроме этого, методы адаптивного управления позволяют обеспечить функционирование системы управления БПЛА при возникновении нештатных ситуаций. Разрешение таких ситуаций может быть осуществлено алгоритмическими средствами в процессе их прогнозируемого возникновения. Так, в частности, возникновение сбоя по знаку управляющего сигнала в боковом канале может привести к смещению бокового отклонения и даже к потере устойчивости [8]. Сохранение устойчивости может быть достигнуто при переключении значений одного или более параметров, обеспечивающих устойчивость и высокое качество при штатной ситуации, на величины, соответствующие идентифицируемой нештатной ситуации в целях удовлетворения требованиям технического задания на систему [11, 15].

2. АЛГОРИТМ СТАБИЛИЗАЦИИ НА РЕЖИМАХ ПЛАНИРУЮЩЕГО И МАРШЕВОГО ДВИЖЕНИЙ БПЛА

Неотъемлемой частью общей задачи управления угловым движением БПЛА является управление в режиме стабилизации планирующего движения, во время которого существенно изменяются параметры математической модели БПЛА. Режим полета на маршевой высоте следует рассматривать как частный случай планирующего движения. Необходимость и целесообразность применения адаптации для решения задачи угловой стабилизации планирующего движения вызвана как нестационарностью БПЛА, так и наличием множества факторов, основные из которых:

- ограниченность функциональных возможностей традиционного управления в условиях существенной нестационарности параметров БПЛА;
- невысокая точность по угловым координатам при возникновении возмущений, действующих на БПЛА, например, ветровых порывов, которые могут привести к неустойчивости движения;
- снижение качества переходных процессов при больших углах атаки, поскольку значительная часть сигнала управления на руль высоты $\delta_{в.бал}$

расходуется на поддержание его балансировочного значения.

Указанные недостатки особенно проявляются в реальных условиях при управлении БПЛА, рулевые поверхности которого используются во всех каналах управления.

Дополнительное адаптивное управление формируется с помощью введения дополнительного канала управления параллельного с основным. Этот канал также адаптивный. Он реализован по схеме непрямого адаптивного управления, содержит интегрирующее устройство с изменяющимся коэффициентом усиления. Алгоритм изменения этого коэффициента синтезируется из условия обеспечения требуемой динамической точности движения при действии внешних возмущений на БПЛА.

Рассмотрим на примере управления БПЛА по углу тангажа особенности реализации дополнительного адаптивного интегрирующего канала.

Базовый адаптивный алгоритм управления и стабилизации в канале тангажа БПЛА имеет вид:

$$u_{\vartheta_3}(t) = K_{\vartheta_3}(q)(\vartheta(t) - \vartheta_3(t)) + K_{\omega_z}(q)\omega_z(t), \quad (2)$$

где ϑ_3 — выходной сигнал задающего устройства,

$\omega_z = \frac{d\vartheta}{dt}$ — угловая скорость, $K_{\vartheta_3}(q)$ и $K_{\omega_z}(q)$ — ко-

эффициенты передачи, перестраиваемые в функции от скоростного напора q , значения которых обеспечивают устойчивость и качество процессов. Сигнал ϑ_3 состоит из медленной и быстрой компонент:

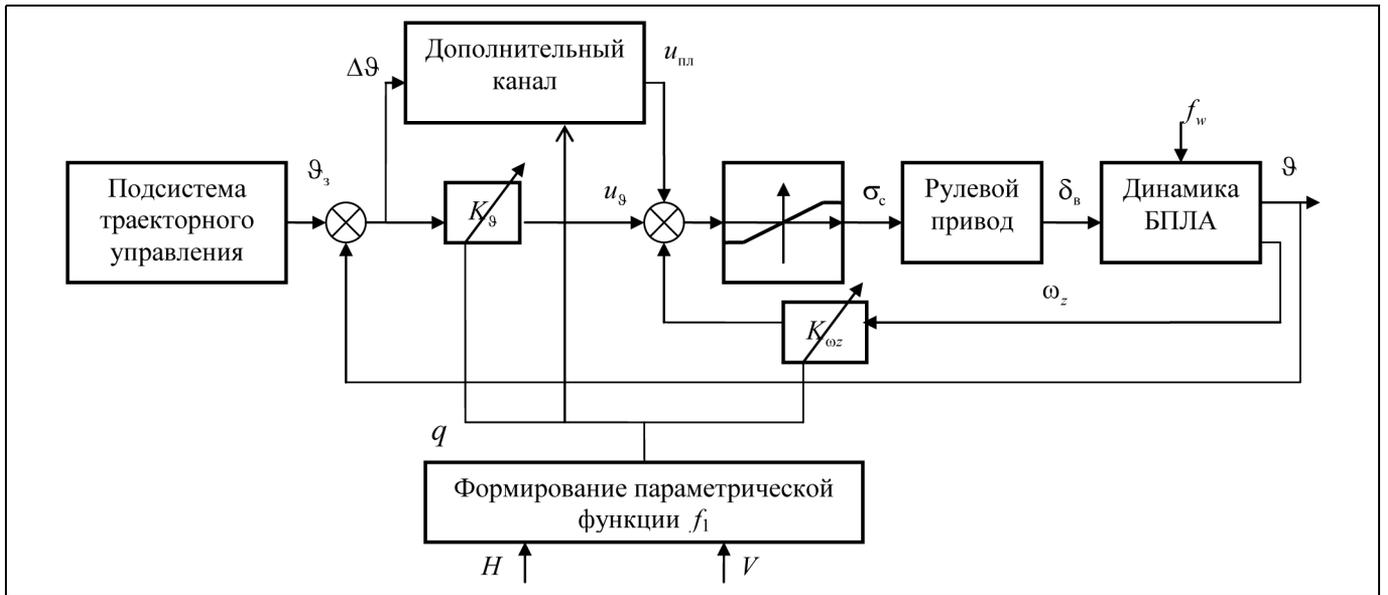
— медленная компонента $\vartheta_{3,м}(t)$ формируется в зависимости от изменяющегося балансировочного угла атаки $\alpha_{бал}(t)$ и отклонения рулей высоты $\Delta\delta_{в.бал}(t)$; функции $\alpha_{бал}(t)$ и $\Delta\delta_{в.бал}(t)$ определяются особенностями планирующего и маршевого режимов полета БПЛА;

— текущая, быстрая компонента $\vartheta_{3,б}(t)$ соответствует угловым разворотам БПЛА при выполнении им заданного маневра.

Алгоритм функционирования дополнительного канала на режиме планирующего движения имеет вид:

$$u_{пл}(t) = \begin{cases} \sigma_{и}(t) & \text{при } |\sigma_{и}(t)| < A_{и}(q), \\ A_{и}(q) & \text{при } |\sigma_{и}(t)| \geq A_{и}(q), \end{cases} \quad (3)$$

где $\sigma_{и} = K_i(q) \int \Delta\vartheta(t) dt$ — интегральная составляющая сигнала управления, $\Delta\vartheta = \vartheta(t) - \vartheta_3(t)$, $K_i(q)$ — масштабный коэффициент.



Структурная схема канала тангажа системы управления БПЛА на режимах планирующего и маршевого движений

Величина $A_{\text{и}}(q)$ соответствует балансировочному расчетному значению отклонения рулей в планирующем режиме. В целом, уровень ограничения формируется в виде:

$$A_{\text{и}}(q) = K_{\text{м}}/q, \quad (4)$$

где $K_{\text{м}}$ — коэффициент масштабирования.

Аппаратурно дополнительный канал в соответствии с алгоритмами (3) и (4) реализуется на основе интегрирующего усилителя, выходной сигнал которого ограничивается специальным устройством — функционально-адаптивным ограничителем уровня $A_{\text{и}}(q)$.

Базовый сигнал управления $u_{\vartheta}(t)$ и сигнал $u_{\text{пл}}(t)$, соответствующий сигналу $\delta_{\text{в.бал}}$, суммируются, формируя сигнал управления $\sigma_c(t)$:

$$\sigma_c(t) = u_{\vartheta}(t) + u_{\text{пл}}(t), \quad (5)$$

который также ограничивается по уровню. Уровень данного ограничения определяется с учетом отработки этими же рулями сигналов управления смежных каналов (курса, крена).

Отметим, что предложенное структурное формирование адаптивного алгоритма стабилизации в виде (2)—(5) определяется спецификой и уникальностью режима стабилизации планирующего полета БПЛА. Данное формирование алгоритма базируется на особой функции, характеризующей обеспечение балансировочных значений угла атаки $\alpha_{\text{бал}}(t)$ и угла отклонения рулей высоты $\Delta\delta_{\text{в.бал}}(t)$,

с учетом поддержания требуемого соотношения $\alpha_{\text{бал}}/\delta_{\text{в.бал}}$ [2, 12, 13].

Содержательный момент при разработке дополнительного канала, который формирует балансировочную компоненту, заключается в следующей последовательности построения [16—19]:

- использование в качестве входного сигнала дополнительного канала рассогласования $\Delta\vartheta(t)$;
- реализация алгоритмов (3) и (4) на основе интегратора, в котором существует фиксированный уровень ограничения, соответствующий расчетному балансировочному значению угла отклонения рулей;
- организация синхронной адаптации, при которой одновременно перестраиваются параметры основного и дополнительного каналов.

Структурная схема системы управления по тангажу, в которой реализованы алгоритмы (2)—(5), представлена на рисунке, где f_w — возмущение, возникающее в результате порыва ветра, турбулентности атмосферы и прочих внешних воздействий на БПЛА.

Результаты исследования гипотетической системы управления с двумя видами структур (без дополнительного канала и при его введении) свидетельствуют, что при вертикальных возмущениях f_w типа порывов ветра, турбулентностей и других возмущающих факторах дополнительный сигнал $u_{\text{пл}}(t)$, соответствующий балансировочному значению рулей $\delta_{\text{в.бал}}$, в том числе и в зоне ограничения,

обеспечивает устойчивость балансировочного угла атаки.

Исследование и алгоритмическая реализация варианта данного подхода для канала крена БПЛА подробно рассмотрена в работе [20].

3. ОСОБЕННОСТИ СОЧЕТАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО И РЕАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЙ БПЛА

Задача совместного использования реактивного и аэродинамического управлений впервые была поставлена и полностью решена после первого запуска воздушно-космического самолета «Буран» при управлении траекторным движением на участке снижения и маневрирования [1, 8, 17]. Эта задача актуальна и в настоящее время для сохранения спускаемых объектов. При сочетании аэродинамического управления (АДУ) и реактивного возникает ряд специфических проблем, требующих своего решения. Рассмотрим основные из них.

Необходимость формирования дополнительно-газодинамического — реактивного управления (реализуемого с помощью реактивной системы управления — РСУ) возникает, прежде всего, при полете БПЛА на больших высотах в разреженной атмосфере, когда средств (ресурса) АДУ недостаточно для отработки управляющих воздействий значительного уровня при одновременном действии на БПЛА заданных максимальных по модулю ветровых возмущений. Далее, при дополнительном газодинамическом управлении (РСУ) обеспечивается более надежное управление в условиях заданных максимальных по модулю разбросов параметров аэродинамических характеристик, инерционных массово-центровочных характеристик, параметров системы управления, рулевых приводов аэродинамических органов, отказов гидравлических систем АДУ и управляющих двигателей в РСУ, а также при одновременно действующих управляющих и возмущающих воздействиях.

Отметим, что в теории и практике синтеза систем автоматического управления основное, традиционное внимание уделяется вопросам обеспечения устойчивости и качества управления. При решении этой задачи «по умолчанию» подразумевается достаточность ресурса управления. Однако для динамических объектов, таких как рассматриваемый класс БПЛА, существенна проблема достаточности управления. Действительно, для выполнения полетного задания на воспроизведение требуемых значений углов рыскания, крена и тангажа часто остается недостаточный диапазон изменения рулевых аэродинамических органов, поскольку часть ресурса АДУ используется для поддержания балансировочного режима и компенсации внеш-

них возмущений. В работах [8, 20] данная проблема определена как дефицит управления. Поэтому задача анализа достаточности управления для БПЛА является первостепенной и актуальной. Основу подхода к решению проблемы дефицита управления составляет динамический анализ правой части дифференциальных уравнений (1), описывающих движение ЛА. Это позволяет оценить возможность управлять БПЛА при наличии возмущений и переменных параметров объекта. Так, для канала тангажа, в соответствии с работой [20], в правой части системы уравнений, описывающих угловое движение, для оценки дефицита управления используются функции возмущений [8]

$$f_y(t) = a_3(t) \cdot \delta_b(t) \quad (6)$$

и

$$f_b(t) = a_2(t) \cdot \alpha_w(t), \quad (7)$$

где $a_2(t)$ и $a_3(t)$ — динамические коэффициенты, получаемые в результате линеаризации первого уравнения системы (1); α_w — угол атаки, вызванный действием ветрового возмущения.

На основе функций (6) и (7) дефицит управления определяется разностями:

$$\text{def}u(t) = f_b(t) - f_y(t), \quad (8)$$

$$\text{def}\dot{u}(t) = \frac{d}{dt}f_b(t) - \frac{d}{dt}f_y(t). \quad (9)$$

При малых скоростях изменения коэффициентов $a_2(t)$ и $a_3(t)$ выражение (7) можно представить в виде

$$\text{def}\dot{u}(t) = a_3(t) \frac{d}{dt} \delta_b(t) - a_2(t) \frac{d}{dt} \alpha_w(t). \quad (10)$$

Учет производных при определении дефицита управления необходим, поскольку реальный рулевой привод АДУ имеет ограничение по углу δ_b и скоростной характеристике $\dot{\delta}_b$. Информация о дефиците управления в виде (8), (9) или (10) используется для коррекции параметров адаптивных алгоритмов управления АДУ вида (2)—(5) и определения моментов включения и продолжительности работы управляющих двигателей. Более подробно проблема дефицита управления рассмотрена в работах [7, 8, 19].

Из условия рационального расходования ресурса управляющих двигателей и топлива на борту БПЛА при синтезе контура РСУ необходимо выполнять основное требование: последовательное включение двигателей на основе оценки текущего состояния контура стабилизации. Реализация данного требования обеспечивает своевременное под-



ключение двигателей в целях исключения критических режимов, обусловленных ограничениями системы АДУ, и ограничениями в системе функционирования управляющих двигателей в условиях, когда АДУ располагает достаточными ресурсами для решения задач управления БПЛА.

Кроме традиционных задач, связанных с обеспечением устойчивости и качества процессов управления, при синтезе контура РСУ необходимо решать задачи:

— устойчивого включения двигателей с исключением явлений «дребезга» при уровнях сигналов управления в окрестности уставок включения каждого управляющего двигателя;

— корректного сопряжения алгоритмов РСУ с алгоритмами АДУ при смешанном управлении, когда необходимо реализовать сочетание аэродинамического и реактивного управлений различной интенсивности;

— обнуления компонент-сигналов управления РСУ к моменту перехода со смешанного управления на аэродинамическое.

При формировании смешанного управления должно выполняться множество основных критериев $J = \{J_1, \dots, J_6\}$, по которым также проводится обобщенная оценка эффективности использования канала РСУ, где:

J_1 — оценка корректности функционирования канала РСУ, исходя из текущей оценки фазового и динамического состояния контура угловой стабилизации БПЛА;

J_2 — характеризует ограничение функционирования управляющих двигателей при выполнении поставленных задач, например, по оценке расхода топлива, пропорционального суммарному импульсу двигателей [21]:

$$J_2 = \int_{H_0}^{H_k} |N_{y,d}| dH = \int_{t_{H_0}}^{t_{H_k}} |N_{y,d}| dt \rightarrow \min,$$

H_0, H_k — начальная и конечная высоты полета; t_{H_0} и t_{H_k} — время, соответственно, включения и отключения канала РСУ; $N_{y,d}$ — число работающих управляющих двигателей;

J_3 — определяет степень близости к критическим значениям координат угла скольжения β и боковой допустимой перегрузки n_z : $\beta \rightarrow \min, |n_z| < n_{z, \text{доп}}$;

J_4 — определяет степень колебательности или допустимость автоколебаний и их параметров: амплитуды и частоты;

J_5 — определяет запас по шарнирному моменту $M_{ш}$ руля АДУ относительно его тормозного значения $M_{ш,т}$: $M_{ш} < M_{ш,т}$;

J_6 — определяет степень инвариантности угла скольжения β к углу крена γ .

Множество критериев J дополняет критерий бездефицитности управления:

— по уровню функции управления на основе условия (8);

— по производной функции управления на основе условия (9) или (10) при обеспечении устойчивости движения «в малом» и «в большом» [7, 18].

Как показали результаты моделирования системы стабилизации БПЛА, содержащей канал РСУ, система удовлетворяет всем критериям из множества J . При отсутствии РСУ критерии J_4, J_6 и условия (7)–(9) критерия бездефицитности управления не всегда удовлетворяются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматическое управление сложными динамическими объектами нового поколения, такими как многорежимные БПЛА, должно основываться не только на известных принципах управления, но и на конструктивных особенностях аппаратов, требует как модернизации известных прогрессивных решений, так и поиска новых нетрадиционных средств управления. Расширение возможностей БПЛА, например, увеличение максимальных значений скорости рулевого привода и отклонения рулей, уменьшение по модулю значения собственной устойчивости аппарата, повышение степени эффективности рулей, а также изменение параметров его системы управления позволяет решать проблему дефицита управления и обеспечить высокое качество управления на всех режимах функционирования БПЛА. Введенные критерии смешанного управления, обеспечивающие решение проблемы дефицита управления, и их количественные значения относятся к числу основных характеристик систем автоматического управления и регулирования и позволяют провести структурный, аналитический и алгоритмический синтез управления.

Предлагаемый подход к построению управления многорежимным БПЛА применяется в разработках систем управления ФГУП МОКБ «Марс» для новых современных летательных аппаратов, предназначенных для полетов в существенно расширенной области траекторий в условиях действия возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Буря». Основы проектирования интеллектуальной системы управления орбитальным кораблем на атмосферном участке полета / Под ред. А.С. Сырова. — М.: Изд-во МОКБ «Марс», 2013. — 276 с.
2. Пучков А.М., Горбунов Н.И., Дубинкин И.М., Труфакин В.А. Синтез аэрогазодинамического управления боковым движением воздушно-космического самолета для автоматического и ручного режимов полета // Вопросы авиационной науки и техники / Науч.-техн. сб. Сер. «Проблемы создания авиационно-космических систем». — 1989. — Вып. 2. — С. 81–118.
3. Основы формирования облика систем управления авиационного ракетного вооружения / Э.М. Абадеев, Ю.П. Балыко, В.В. Ляпунов и др.; под ред. В.В. Трусова. — М.: Изд.-торговая корпорация «Дашков и К», 2012. — 176 с.
4. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1973. — 616 с.
5. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов / Под ред. Г.С. Бюшгенса. — М.: Наука, 1998.
6. Колесников А.А. Новые нелинейные методы управления полетом. — М.: Физматлит, 2013. — 196 с.
7. Пучков А.М., Труфакин В.А. Принцип бездефицитности управления летательного аппарата и некоторые критерии его удовлетворения // Авиакосмическая техника и технология. — 1996. — № 3. — С. 36–41.
8. Сыров А.С., Пучков А.М., Зеликин М.У., Стеблецов В.Г. Приводы систем автоматики и управления полетом летательных аппаратов. Дефицит управления, энергетика, расчет параметров. — М.: МАИ, 1997.
9. Сыров А.С., Пучков А.М., Селезнев А.Е., Глумов В.М. Алгоритмы модернизированного координированного управления беспилотным летательным аппаратом // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (16–19 июня 2014 г., Москва, ИПУ РАН). — М., 2014. — С. 3407–3416.
10. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. — М.: Наука, 1987. — 712 с.
11. Пат. № 2460113 РФ, кл. G05D 1/08. Способ формирования адаптивного сигнала стабилизации планирующего движения беспилотного летательного аппарата и устройство для его осуществления / А.С. Сыров, А.М. Пучков, Б.Н. Попов и др. // опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24.
12. Рутковский В.Ю., Глумов В.М., Суханов В.М. Прецизионное управление нестационарными летательными аппаратами по углу крена // Проблемы управления. — 2011. — № 5. — С. 82–87.
13. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. О синтезе самонастраивающейся системы управления с эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. — 1966. — № 3. — С. 70–77.
14. Емельянов С.В. Избранные труды: в 2 т. / Отв. ред. акад. С.К. Коровин. — М.: Изд-во МГУ, 2009. — Т. 1. — 560 с.
15. Ескин А.Ф. Основы проектирования систем стабилизации высокоточных ракет Сухопутных войск / Под общ. ред. В.Л. Солунина. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. — 192 с.
16. Пат. 2473107 РФ, кл. G05D 1/00. Способ формирования цифроаналогового сигнала управления для бортовых систем управления угловым движением беспилотных летательных аппаратов и устройство для его осуществления / А.С. Сыров, А.М. Пучков, Н.П. Жданович // Опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2.
17. Глумов В.М., Земляков С.Д., Пучков А.М., Рутковский В.Ю. Управление угловым положением нестационарного космического аппарата с переменной эффективностью управляющих моментов // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2000. — № 1. — С. 120–134.
18. Пат. 2459744 РФ, кл. G05D 1/08. Способ формирования интегрального сигнала стабилизации планирующего движения беспилотного летательного аппарата и устройство для его осуществления / А.С. Сыров, А.М. Пучков, Б.Н. Попов и др. // Опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24.
19. Сыров А.С., Пучков А.М., Черепанова В.Е. Принцип динамичного разнополярного астатического регулирования для систем автоматического управления летательными аппаратами // Третья междунар. конф. по проблемам управления (20–22 июня 2006 г., Москва, ИПУ РАН): Пленарные доклады и избранные труды. — М., 2006. — 917 с.
20. Пучков А.М., Карева Е.М., Глумов В.М. Синтез и цифровая реализация адаптивного алгоритма управления летательным аппаратом // Труды IX междунар. науч.-техн. конф. «Идентификация систем и задачи управления». — М., 2012. — С. 896–906.
21. Разыграев А.П. Основы управления полетом космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1990. — 118 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Сыров Анатолий Сергеевич — д-р техн. наук, гл. конструктор, Московское опытно-конструкторское бюро «Марс»,
☎ (495) 688-64-44, ✉ office@mokb-mars.ru,

Пучков Александр Михайлович — д-р техн. наук, нач. лаборатории, Московское опытно-конструкторское бюро «Марс»,
☎ (495) 688-64-44, ✉ office@mokb-mars.ru,

Рутковский Владислав Юльевич — д-р техн. наук, зав. лабораторией, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
☎ (495) 334-87-30, ✉ rutkov@ipu.ru,

Глумов Виктор Михайлович — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-87-79, ✉ vglum@ipu.ru.

Читайте в следующем номере

Бреер В.В., Новиков Д.А., Рогаткин А.Д. Микро- и макромоделли социальных сетей: теория

Рассмотрены два подхода к построению и исследованию моделей социальных сетей: макро- и микроописание. Согласно первому из них структура связей в социальной сети усредняется и поведение агентов рассматривается «в среднем». В соответствии со вторым подходом принимается во внимание структура графа влияний агентов и их индивидуальное принятие решений. Дано сравнение этих подходов на примере пороговой модели коллективного поведения с единым относительным порогом.