

Методика автоматизированного определения параметров алгоритмов стабилизации беспилотных летательных аппаратов с заданными запасами устойчивости

© Г.Г. Плавник, О.Л. Точилова, А.Н. Лошкарёв

АО «ВПК «НПО машиностроения», Реутов, 143966, Россия

Представлена методика определения параметров алгоритмов стабилизации беспилотных летательных аппаратов, позволяющая автоматизировать процесс выбора параметров с заданными запасами устойчивости. Методика основана на взаимосвязи значений корней характеристического уравнения и вида переходной функции рассматриваемой системы. Оценка запаса устойчивости и быстродействия системы осуществляется по виду кривой переходного процесса при типовом входном воздействии. Благодаря этому использование методики позволяет оперативно определять параметры алгоритмов стабилизации, обеспечивающие заданные характеристики переходных процессов. Определены параметры корней характеристического уравнения, позволяющие реализовать заданную длительность переходного процесса обработки возмущений с требуемой точностью и допустимым перерегулированием. Приведен пример использования методики для анализа упрощенной модели движения летательного аппарата в вертикальной плоскости. Для проверки полученных результатов применена разработанная ранее методика исследования устойчивости движения беспилотных летательных аппаратов на основе построения их областей устойчивости.

Ключевые слова: моделирование движения, беспилотный летательный аппарат, переходный процесс, запас устойчивости, характеристическое уравнение, алгоритм стабилизации, коэффициент стабилизации, область устойчивости

Введение. Одной из важнейших задач при исследовании устойчивости движения современных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является оперативное определение параметров алгоритмов стабилизации, к которым в первую очередь относятся коэффициенты стабилизации. Существуют разные пути решения этой задачи [1–3].

Предлагаемая методика определения параметров алгоритмов стабилизации БПЛА позволяет автоматизировать процесс выбора коэффициентов стабилизации с заданными запасами устойчивости, что особенно важно при широком диапазоне рассматриваемых траекторий [4]. Она дополняет приведенную в работе [5] методику исследования устойчивости движения БПЛА на основе построения их областей устойчивости с учетом допусков. Для реализации методики разработан комплекс программ в среде MATLAB, позволяющий оперативно проводить анализ устойчивости движения БПЛА.

Выбор одной из двух указанных методик зависит от цели исследования. Например, для проведения полного цикла анализа устойчи-

востности движения БПЛА в соответствии с его линейной математической моделью необходимо применять методику на основе построения областей устойчивости. В этом случае коэффициенты стабилизации определяют в интерактивном режиме из полученных областей устойчивости с последующей проверкой запасов устойчивости по амплитуде и фазе. Таким образом, получаем информацию обо всех допустимых значениях коэффициентов стабилизации для их последующего использования при моделировании движения БПЛА в соответствии с полной математической моделью в цифровом моделирующем комплексе (ЦМК).

Если интерес представляет изучение динамических свойств системы с целью получить переходные процессы с заданными характеристиками, то вместо перебора значений параметров из областей устойчивости удобнее воспользоваться взаимосвязью передаточной и переходной функций. Такой подход позволил бы непосредственно получать значения искомых параметров и существенно сократить время проведения анализа.

Постановка задачи. Рассмотрим суть использования каждой из указанных методик на примере анализа упрощенной модели движения БПЛА в вертикальной плоскости (рис. 1). Один из подходов к синтезу контура стабилизации изложен в работе [6].

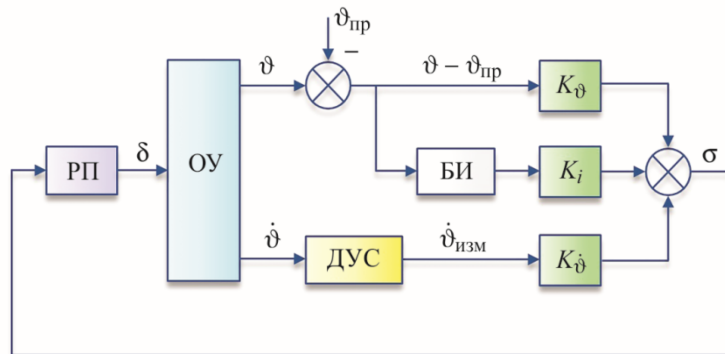


Рис. 1. Структурная схема контура стабилизации БПЛА:

РП — рулевой привод; ОУ — объект управления; БИ — блок интегрирования; ДУС — датчик угловой скорости; δ — угол поворота руля, рад; ϑ — угол тангажа, рад; $\vartheta_{пр}$ — программное значение угла тангажа, рад; $\dot{\vartheta}$ — скорость изменения угла тангажа, рад/с; $\dot{\vartheta}_{изм}$ — измеренное значение скорости изменения угла тангажа, рад/с; K_{ϑ} , K_i , $K_{\dot{\vartheta}}$ — коэффициенты стабилизации; σ — командный сигнал на отклонение руля, рад

Все переменные заданы в отклонениях от их значений при невозмущенном движении. Объект управления и рулевой привод описываются следующей системой линейных дифференциальных уравнений в скоростной системе координат:

$$\begin{cases} \ddot{\vartheta} = a_2\alpha + a_3\delta, \\ \dot{\alpha} = \dot{\vartheta} - a_4\alpha - a_5\delta, \\ \frac{\tau}{D}\ddot{\delta} + \frac{1}{D}\dot{\delta} + \delta = \sigma, \end{cases} \quad (1)$$

где $a_2 = M_z^\alpha / J_z$ — коэффициент, характеризующий статическую устойчивость БПЛА, $1/c^2$ (M_z^α — производная аэродинамического момента тангажа M_z по углу атаки, Н·м/рад; J_z — момент инерции БПЛА относительно поперечной оси, кг·м²); α — отклонение угла атаки от невозмущенного значения, рад; $a_3 = M_z^\delta / J_z$ — коэффициент, характеризующий эффективность руля, $1/c^2$ (M_z^δ — производная аэродинамического момента тангажа M_z по углу поворота руля, Н·м/рад); $a_4 = (P \cos \alpha_{\text{тр}} + Y_a^\alpha) / (mV)$ — коэффициент, характеризующий подъемную силу БПЛА с учетом тяги двигателей, $1/c$ (P — модуль вектора тяги, Н; $\alpha_{\text{тр}}$ — невозмущенное (траекторное) значение угла атаки, рад; Y_a^α — производная аэродинамической подъемной силы Y_a по углу атаки, Н/рад; m — масса БПЛА, кг; V — модуль вектора скорости, м/с); $a_5 = Y_a^\delta / (mV)$ — коэффициент, характеризующий подъемную силу руля, $1/c$ (Y_a^δ — производная аэродинамической подъемной силы Y_a по углу поворота руля); τ — постоянная времени РП, с; D — добротность РП, $1/c$.

В этой постановке задачи полагаем, что угол наклона траектории, соответствующий невозмущенному движению БПЛА, равен нулю.

Значение командного сигнала на отклонение руля вычисляется по закону

$$\sigma = K_\vartheta (\vartheta - \vartheta_{\text{пр}}) + K_i \frac{1}{p} (\vartheta - \vartheta_{\text{пр}}) + K_\delta \frac{\dot{\vartheta}}{T_d p + 1}, \quad (2)$$

где p — оператор дифференцирования, $1/c$; T_d — постоянная времени ДУС, с.

Характеристическое уравнение системы (1) с учетом закона управления (2) в этом случае имеет вид

$$c_0 s^7 + c_1 s^6 + c_2 s^5 + c_3 s^4 + c_4 s^3 + c_5 s^2 + c_6 s + c_7 = 0. \quad (3)$$

Коэффициенты c_i выражаются через коэффициенты системы (1) и закона управления (2) следующим образом:

$$\begin{aligned}c_0 &= \frac{\tau T_d}{D}; \\c_1 &= \frac{1}{D}(T_d + \tau + a_4 \tau T_d); \\c_2 &= T_d + \frac{1}{D}(1 + a_4(T_d + \tau) - a_2 \tau T_d); \\c_3 &= 1 + a_4 T_d + \frac{1}{D}(a_4 - a_2(T_d + \tau)); \\c_4 &= a_4 - a_2 \left(T_d + \frac{1}{D} \right) - a_3 (T_d K_\vartheta + K_{\dot{\vartheta}}); \\c_5 &= -a_2 - (a_3(1 + a_4 T_d) K_\vartheta + c K_{\dot{\vartheta}} + K_i T_d); \\c_6 &= -c K_\vartheta - a_3(1 + a_4 T_d) K_i; \\c_7 &= -c K_i,\end{aligned}$$

где $c = a_3 a_4 - a_2 a_5$ — вспомогательный параметр.

Задача заключается в определении значений коэффициентов стабилизации K_ϑ , K_i , $K_{\dot{\vartheta}}$, обеспечивающих требуемые характеристики переходных процессов.

Описание методики определения коэффициентов стабилизации. Предлагаемая методика основана на том, что характеристики переходных процессов однозначно определяются распределением нулей (корней числителя) и полюсов (корней знаменателя) передаточной функции исследуемой системы. В этом случае задача сводится к определению значений коэффициентов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции, соответствующих заданному распределению нулей и полюсов. Поскольку коэффициенты передаточных функций или исходных дифференциальных уравнений, из которых эти функции получены, зависят от параметров отдельных звеньев системы, то с учетом этих зависимостей можно составить систему из N алгебраических уравнений, где N — порядок полинома знаменателя передаточной функции, т. е. порядок характеристического уравнения исследуемой системы. Если число изменяемых параметров меньше N или некоторые из корней оказываются мнимыми, анализ полученных уравнений может принести пользу, так как небольшие отступления от оптимальных значений коэффициентов существенно не влияют на динамические характеристики исследуемой системы [7]. Подробнее метод модального управления изложен в работе [8].

Для получения переходных процессов с требуемыми характеристиками прежде всего нужно задать рабочий диапазон значений частот, который определяется корнями характеристического уравнения, наиболее близко расположенными к мнимой оси слева от нее [9].

Рабочими частотами для задач стабилизации в первую очередь являются частоты твердого тела, так как все вопросы, связанные с высокочастотными диапазонами, решаются путем разработки соответствующих корректирующих контуров и в данном примере не рассматриваются.

В связи с этим исключим из исходного характеристического уравнения (3) все члены, не влияющие на характер переходных процессов в заданном рабочем диапазоне значений частот и не зависящие от коэффициентов стабилизации. Кроме того, в простейшем случае можно полагать, что $\tau = T_d = 0$, так как эти параметры мало влияют на корни, ближе всего расположенные к мнимой оси, т. е. на корни, соответствующие твердому телу. Тогда получим:

$$\begin{aligned} b_0 s^4 + b_1 s^3 + b_2 s^2 + b_3 s + b_4 &= 0; \\ b_0 &\approx 1; \\ b_1 &= a_4 - \frac{a_2}{D} - a_3 K_{\dot{\vartheta}}; \\ b_2 &= -a_2 - a_3 K_{\vartheta} - c K_{\dot{\vartheta}}; \\ b_3 &= -c K_{\vartheta} - a_3 K_i; \\ b_4 &= -c K_i. \end{aligned} \quad (4)$$

В качестве требуемых корней характеристического уравнения (4) рассмотрим два комплексно сопряженных и два действительных корня и представим их в следующем виде (рис. 2):

$$s_{1,2} = -\xi\omega \pm i\omega\sqrt{1-\xi^2}; \quad s_3 = -\varepsilon_1, \quad s_4 = -\varepsilon_2, \quad (5)$$

$$0 < \xi < 1; \quad \omega > 0; \quad \varepsilon_1 > 0; \quad \varepsilon_2 > 0. \quad (6)$$

Тогда требуемое характеристическое уравнение имеет вид

$$(s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)(s + \varepsilon_1)(s + \varepsilon_2) = 0. \quad (7)$$

Раскрыв скобки в уравнении (7), получим:

$$\begin{aligned} b_{0T} s^4 + b_{1T} s^3 + b_{2T} s^2 + b_{3T} s + b_{4T} &= 0; \\ b_{0T} &= 1; \\ b_{1T} &= 2\xi\omega + \varepsilon_1 + \varepsilon_2; \\ b_{2T} &= \varepsilon_1\varepsilon_2 + 2\xi\omega(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \omega^2; \\ b_{3T} &= 2\xi\omega\varepsilon_1\varepsilon_2 + \omega^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2); \\ b_{4T} &= \varepsilon_1\varepsilon_2\omega^2. \end{aligned} \quad (8)$$

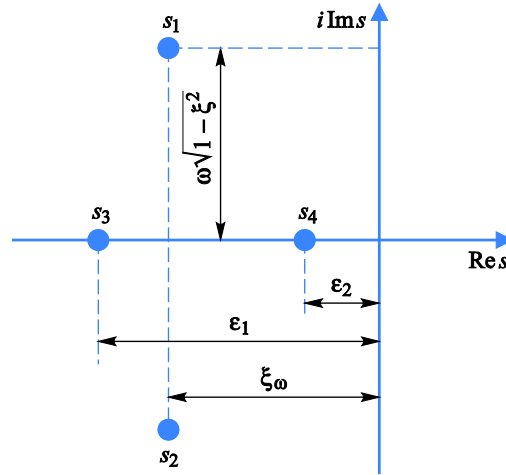


Рис. 2. Расположение корней на комплексной плоскости

Приравняв соответствующие коэффициенты уравнений (4) и (8), получим искомые выражения для коэффициентов стабилизации:

$$K_{\dot{\vartheta}} = -\left(b_{1T} + \frac{a_2}{D} - a_4\right) / a_3, \quad (9)$$

$$K_{\vartheta} = -(b_{2T} + a_2 + cK_{\dot{\vartheta}}) / a_3, \quad (10)$$

$$K_{i1} = -(b_{3T} + cK_{\vartheta}) / a_3, \quad (11)$$

$$K_{i2} = -b_{4T} / c. \quad (12)$$

Целесообразно приблизить значение K_{i1} к значению K_{i2} , варьируя коэффициент ϵ_2 из заданного диапазона.

Пример использования методики. В качестве примера рассмотрим математическую модель (1)–(3) со значениями коэффициентов:

$$a_2 = 40,2 \frac{1}{c^2}, \quad a_3 = -34,7 \frac{1}{c^2}, \quad a_4 = 0,868 \frac{1}{c}, \quad a_5 = 0,082 \frac{1}{c}, \quad (13)$$

$$D = 50 \frac{1}{c}, \quad \tau = 0,01 \text{ с}, \quad T_d = 0,008 \text{ с} \quad (14)$$

и приведем результат моделирования движения БПЛА для следующих начальных условий:

$$\vartheta(0) = \frac{\pi}{180} \text{ рад}, \quad \alpha(0) = \delta(0) = 0, \quad \dot{\vartheta}(0) = \dot{\delta}(0) = 0.$$

Полагаем, что $\vartheta_{пр} = 0$.

Зададим параметры корней в представлении (5), (6):

$$\xi = 0,7071, \quad \omega = 2\pi \approx 6,2832, \quad \epsilon_1 = 5, \quad \epsilon_2 = 0,68.$$

Тогда, в соответствии с выражениями (9)–(12), получим следующие значения коэффициентов стабилизации:

$$K_{\dot{\vartheta}} = 0,4179, \quad K_{\vartheta} = 3,4462, \quad K_{i1} = 4,0141, \quad K_{i2} = 4,0168.$$

График переходного процесса для угла тангажа представлен на рис. 3.

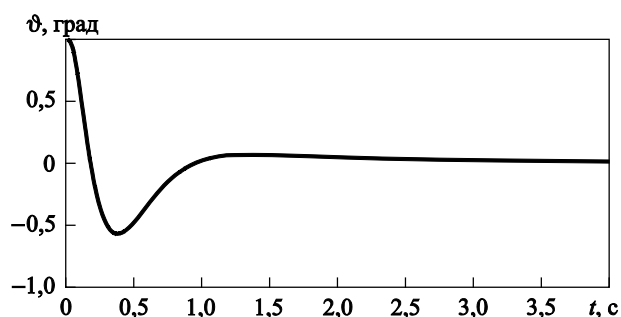


Рис. 3. Зависимость от времени угла тангажа при $K_{\dot{\vartheta}} = 0,4179$, $K_{\vartheta} = 3,4462$, $K_i = K_{i1} = 4,0141$

Для проверки найденных значений $K_{\dot{\vartheta}}$, K_{ϑ} , K_i построим область устойчивости исходной математической модели движения БПЛА (1)–(3) со значениями коэффициентов (13), (14) в плоскости коэффициентов стабилизации K_{ϑ} , $K_{\dot{\vartheta}}$ при фиксированном значении $K_i = 4,0141$.

Воспользуемся для этого разработанным в среде MATLAB модулем построения областей устойчивости на основе заданной структуры линейной математической модели движения БПЛА, сформированной в Simulink в виде подсистем «объект управления», «измерительные приборы», «алгоритм стабилизации» и т. п. [5].

Полученная область устойчивости с отмеченными на ней ранее найденными значениями K_{ϑ} , $K_{\dot{\vartheta}}$ представлена на рис. 4.

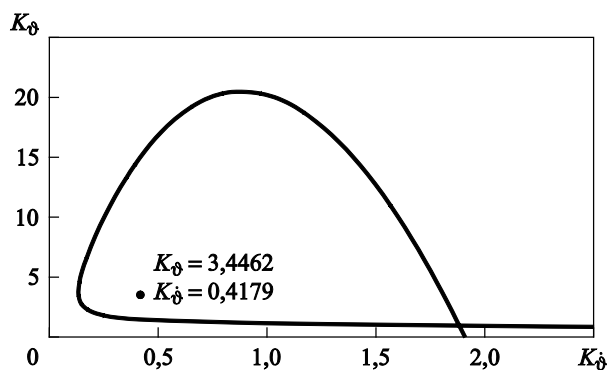


Рис. 4. Область устойчивости при $K_i = 4,0141$

Видим, что значения коэффициентов стабилизации, найденные по упрощенной модели, лежат в области устойчивости, соответствующей исходной модели более высокого порядка.

Оценка запаса устойчивости и быстродействия. Запас устойчивости и быстродействие системы можно определить по виду кривой переходного процесса при типовом входном воздействии, которым может быть как задающее, так и возмущающее воздействие [10].

Склонность системы к колебаниям и, следовательно, запас устойчивости могут быть охарактеризованы максимальным значением управляемой величины (перерегулированием).

Быстродействие системы можно определить по длительности t_{Π} переходного процесса. Величина t_{Π} представляет собой время, протекающее от момента приложения на вход единичного скачка до момента, после которого отклонение управляемой величины $y(t)$ от установившегося значения $y(\infty)$ не превышает заданной точности Δ обработки возмущений. Обычно $\Delta = (0,035 \dots 0,050)y(\infty)$, где $y(\infty) \neq 0$. При $y(\infty) = 0$ полагаем, что $\Delta = (0,035 \dots 0,050)y(0)$, $y(0) \neq 0$.

Определим параметры ξ и ω корней в представлении (5), (6), позволяющие реализовать заданную длительность переходного процесса обработки возмущений с требуемой точностью и допустимым перерегулированием. Для этого в левой части уравнения (7) оставим только первый множитель, т. е. получим характеристическое уравнение второго порядка:

$$s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2 = 0.$$

Оно соответствует дифференциальному уравнению

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \omega^2 y = 0. \quad (15)$$

При $0 < \xi < 1$ уравнение (15) описывает колебательное звено второго порядка [10]. В этом случае решение уравнения (15) с начальными условиями $y(0) = 1$, $\dot{y}(0) = 0$ имеет вид

$$y(t) = \left(\cos \bar{\omega}t + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \bar{\omega}t \right) e^{-\xi\omega t}, \quad (16)$$

где

$$\bar{\omega} = \omega\sqrt{1-\xi^2}; \quad \omega = \frac{\bar{\omega}}{\sqrt{1-\xi^2}}. \quad (17)$$

Типичный вид переходного процесса для величины $y(t)$ представлен на рис. 5.

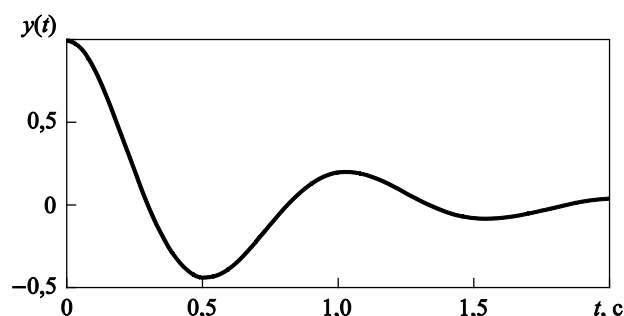


Рис. 5. Вид переходного процесса для $y(t)$ при $\omega = 2\pi$, $\xi = 0,25$

Из выражения (16) следует, что $y(\infty) = 0$. В этом случае будем полагать, что для достижения требуемой точности отработки возмущений при заданной длительности t_n значение $y(t_n)$ должно удовлетворять условию

$$|y(t_n)| \leq 0,05. \quad (18)$$

Известно, что для уменьшения отклонений в переходном процессе следует отдалять полюсы друг от друга. Сближение полюсов не представляет опасности, только если они расположены далеко от мнимой оси. Для упрощенного случая при $\xi < 1$ два комплексно сопряженных корня характеристического уравнения должны располагаться на таком расстоянии от мнимой оси и на таком расстоянии друг от друга вдоль мнимой оси, чтобы выполнялись требования к длительности переходного процесса при заданной точности.

Введем безразмерное время $u = \bar{\omega}t$, в зависимости от которого можно вычислить значение $\bar{\omega}$, необходимое для обеспечения заданной длительности переходного процесса. Тогда выражение (16) преобразуется к виду

$$y(u) = \left(\cos u + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin u \right) \exp\left(-\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} u \right), \quad (19)$$

а выражение (18) — к виду

$$|y(u_n)| \leq 0,05. \quad (20)$$

Поскольку при $\xi < 1$ переходный процесс имеет колебательный характер, целесообразно связать безразмерное время u_{π} окончания переходного процесса с половиной периода колебаний, т. е.

$$u_{\pi} = \bar{\omega} t_{\pi} = \pi; \quad t_{\pi} = \frac{\pi}{\bar{\omega}}; \quad \bar{\omega} = \frac{\pi}{t_{\pi}}.$$

Подставив эти значения в выражения (19) и (17), получим:

$$y(u_{\pi}) = -\exp\left(-\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \pi\right); \quad (21)$$

$$\omega = \frac{\pi}{t_{\pi} \sqrt{1-\xi^2}}. \quad (22)$$

Следует отметить, что точность обработки величины $y(u_{\pi})$ зависит только от значения ξ . Поэтому из соотношения (21) можно получить явное выражение для ξ :

$$\xi = \frac{1}{\pi} \ln\left(-\frac{1}{y(t_{\pi})}\right) \left\{ 1 + \left[\frac{1}{\pi} \ln\left(-\frac{1}{y(t_{\pi})}\right) \right]^2 \right\}^{-1/2}.$$

В соответствии с формулами (21) и (22) вычислим значения $y(u_{\pi})$ и ω , а также расстояние $\xi\omega$ от мнимой оси (см. рис. 2) при $t_{\pi} = 1$ с для нескольких значений ξ из диапазона 0,5...0,9. Результаты вычислений приведены в табл. 1.

Таблица 1

ξ	$y(u_{\pi})$	ω	$\xi\omega$
0,5000	-0,1630	3,6276	1,8138
0,6000	-0,0948	3,9270	2,3562
0,7071	-0,0432	4,4428	3,1415
0,8000	-0,0152	5,2360	4,1888
0,9000	-0,0015	7,2073	6,4866

По данным табл. 1 видно, что при уменьшении ξ вследствие увеличения колебательности системы точность понижается, а при увеличении ξ — повышается, однако при этом увеличивается расстояние от корней s_1, s_2 до мнимой оси (см. рис. 2). Следовательно, возрастает опасность сближения этих корней с более удаленными корнями.

В данном случае оптимальным является значение $\xi = 0,7071$, так как при этом значении $y(u_{\pi})$ уже удовлетворяет условию (20), а дальнейшее увеличение ξ приводит к удалению корней от мнимой оси.

При $\xi \approx 0,7071$ корни характеристического уравнения отстоят от мнимой оси на величину π , а их действительная и мнимая части равны между собой.

На рис. 6 представлен вид переходных процессов для различных значений ξ . Видно, что фактическое значение u_{π} , при котором фиксируется достижение заданной точности $\Delta = 0,05$, варьируется в зависимости от ξ .

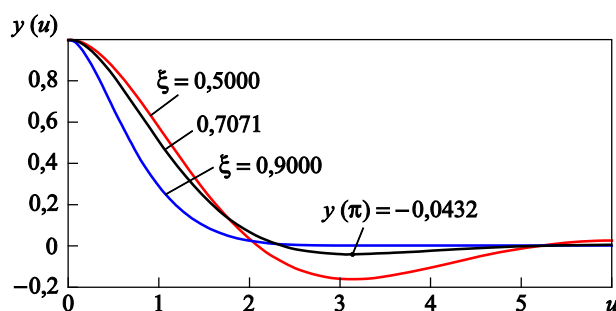


Рис. 6. Вид переходных процессов для различных значений ξ

Фактические значения u_{π} при различных значениях ξ , а также значения t_{π} и $\xi\omega$, вычисленные для $\omega = 2\pi \approx 6,2832$, приведены в табл. 2.

Таблица 2

ξ	u_{π}	$t_{\pi}, \text{с}$	$\xi\omega$
0,5000	4,5805	0,8418	3,1416
0,7071	2,0718	0,4663	4,4429
0,9000	1,7499	0,6389	5,6549

По данным табл. 2 видно, что оптимальный по быстродействию переходный процесс ($t_{\pi} = 0,4663$ с) реализуется при $\xi = 0,7071$. Использование $\xi > 0,7071$ нецелесообразно ни с точки зрения быстродействия, ни с точки зрения опасности сближения корней.

Заключение. Использование представленной методики позволяет:

- автоматизировать процесс выбора коэффициентов стабилизации с заданными запасами устойчивости, оценка которых осуществляется по виду кривой переходного процесса при типовом входном воздействии;

- изучить динамические свойства системы стабилизации без перебора значений параметров из соответствующих областей устойчивости, что существенно сокращает время проведения анализа;
- повысить качество переходных процессов, полученных при моделировании движения БПЛА, благодаря выбору коэффициентов стабилизации с учетом требуемых характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Плавник Г.Г., Лошкарёв А.Н., Точилова О.Л. Использование методики обработки данных на основе вейвлет-анализа для корректировки параметров алгоритмов стабилизации беспилотных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-9-1528
- [2] Корниенко А.А., Плавник Г.Г. Применение искусственных нейронных сетей в системе управления летательного аппарата. *Тр. секции 22 имени академика В.Н. Челомея ХLI Академических чтений по космонавтике*. Реутов, АО «ВПК «НПО машиностроения», 2017, вып. 5, с. 507–513.
- [3] Зенченко М.В., Плавник Г.Г. Стабилизация углового движения летательного аппарата на основе идентификации характеристик летательного аппарата в процессе полета. *Тр. секции 22 имени академика В.Н. Челомея ХL Академических чтений по космонавтике*. Реутов, АО «ВПК «НПО машиностроения», 2016, вып. 4, с. 145–151.
- [4] Малкин В.А. Синтез робастного контура угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата. *Доклады БГУИР*, 2012, № 2 (64), с. 5–10. URL: https://doklady.bsuir.by/m/12_104571_1_71381.pdf (дата обращения 11.12.2018).
- [5] Плавник Г.Г., Лошкарёв А.Н., Точилова О.Л. Методика исследования устойчивости движения беспилотных летательных аппаратов. *Тр. секции 22 имени академика В.Н. Челомея XXXVIII Академических чтений по космонавтике*. Реутов, ОАО «ВПК «НПО машиностроения», 2014, вып. 2, с. 57–64.
- [6] Воробьёва В.Н., Доновский Д.Е. Разработка алгоритмов системы стабилизации управляемого беспилотного летательного аппарата. *Вестник Концерна ПВО «Алмаз – Антей»*, 2015, № 2, с. 69–73. URL: <http://www.almaz-antey.ru/upload/iblock/d57/d5773eb1a43e5a8a0ef225e012e5c746.pdf> (дата обращения 11.12.2018).
- [7] Доброленский Ю.П., Иванова В.И., Поспелов Г.С. *Автоматика управляемых снарядов*. Москва, ГНТИ Оборонгиз, 1963, 548 с.
- [8] Антаневич А.А., Икуас Ю.Ф., Лобатый А.А. Модальное управление беспилотным летательным аппаратом. *Вестник БНТУ*, 2010, № 5, с. 37–40. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/1420/37-40.pdf> (дата обращения 11.12.2018).
- [9] Cook R., Palacios-Nieto R., Goulart P.J. Robust Gust Alleviation and Stabilization of Very Flexible Aircraft. *AIAA Journal*, 2013, vol. 51, no. 2, pp. 330–340.
- [10] Бесекерский В.А., Попов Е.П. *Теория систем автоматического управления*. 4-е изд. Санкт-Петербург, Профессия, 2003, 752 с.

Статья поступила в редакцию 06.12.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Плавник Г.Г., Точилова О.Л., Лошкарёв А.Н. Методика автоматизированного определения параметров алгоритмов стабилизации беспилотных летательных аппаратов с заданными запасами устойчивости. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1850>

Плавник Геннадий Гилярьевич — канд. техн. наук, главный научный сотрудник АО «ВПК «НПО машиностроения», доцент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 15 научных работ в области динамики летательных аппаратов и их систем стабилизации. Области научных интересов: динамика полета, управление движением БПЛА. e-mail: tochilov@vpk.npomash.ru

Точилова Ольга Леонидовна — инженер I категории АО «ВПК «НПО машиностроения». Автор четырех научных работ в области динамики движения летательных аппаратов. Области научных интересов: динамика полета, управление движением БПЛА, вейвлет-анализ. e-mail: forpoint@yandex.ru

Лошкарёв Александр Николаевич — ведущий инженер АО «ВПК «НПО машиностроения». Автор четырех научных работ в области управления и динамики полета летательных аппаратов. Области научных интересов: динамика полета, управление движением БПЛА. e-mail: loshkarev_an@mail.ru

Techniques for automating the determination of the stabilization algorithm parameters of UAV with specified stability margins

© G.G. Plavnik, O.L. Tochilova, A.N. Loshkarev

JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”, Reutov town, 143966, Russia

The article describes the techniques for determining the parameters of the unmanned aerial vehicles stabilization algorithms, which allows automating the process of choosing parameters with the given stability margin. The technique is based on the relationship between the values of the characteristic equation roots and the type of the transition function of the system under consideration. Assessment of stability margin and speed of the system is performed by the form of the transition curve for a typical input action. Using of the technique allows immediate determining the parameters of stabilization algorithms that provide the specified characteristics of transients. The problem of determining the parameters of the characteristic equation roots that allow realizing a given duration of the transient process of disturbance attack with a given accuracy and permissible overshoot is considered. An example of the technique application for analyzing a simplified model of the aircraft motion in a vertical plane is given. The obtained results are verified using the previously developed methodology for studying the stability of unmanned aerial vehicle motion based on the construction of their regions of stability.

Keywords: motion simulation, unmanned aerial vehicle, transient process, stability margin, characteristic equation, stabilization algorithm, stabilization coefficient, stability region

REFERENCES

- [1] Plavnik G.G., Loshkarev A.N., Tochilova O.L. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, issue 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-9-1528
- [2] Kornienko A.A., Plavnik G.G. Primenenie iskusstvennykh neyronnykh setey v sisteme upravleniya letatel'nogo apparata [Using artificial neural networks in the control system of the aircraft]. *Trudy seksii 22 imeni akademika V.N. Chelomeya XLI Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike* [Proceedings of the section 22 named after academician V.N. Chelomey of XLI Academic readings in cosmonautics]. Reutov, JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”, 2017, no. 5, pp. 507–513.
- [3] Zenchenko M.V., Plavnik G.G. Stabilizatsia uglovogo dvizheniya letatel'nogo apparata na osnove identifikatsii kharakteristik letatel'nogo apparata v protsesse poleta [Stabilization of the angular motion of the aircraft based on the identification of the aircraft characteristics during the flight]. *Trudy seksii 22 imeni akademika V.N. Chelomeya XL Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike* [Proceedings of the section 22 named after academician V.N. Chelomey of XL Academic readings in cosmonautics]. Reutov, JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”, 2016, no. 4, pp. 145–151.
- [4] Malkin V.A. Sintez robustnogo kontura uglovoy stabilizatsii bespilotnogo letatel'nogo apparata [Synthesis of the robust contour of the angle stabilization of an unmanned aerial vehicle]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki* [Reports of Belarusian State University of In-

- formatics and Radioelectronics], 2012, no. 2 (64), pp. 5–10. Available at: https://doklady.bsuir.by/m/12_104571_1_71381.pdf (accessed December 11, 2018).
- [5] Plavnik G.G., Loshkarev A.N., Tochilova O.L. Metodika issledovania ustoychivosti dvizhenia bespilotnykh letatelnykh apparatov [Techniques for studying the stability of motion of unmanned aerial vehicles]. *Trudy seksii 22 imeni akademika V.N. Chelomeya XXXVIII Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike* [Proceedings of the section 22 named after academician V.N. Chelomey of XXXVIII Academic readings in cosmonautics]. Reutov, JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”, 2014, no. 2, pp. 57–64.
- [6] Vorobyeva V.N., Donovsky D.E. *Vestnik Kontserna PVO “Almaz-Antey” (Bulletin of the “Almaz-Antey” Air Defense Concern)*, 2015, no. 2, pp. 69–73. Available at: <http://www.almaz-antey.ru/upload/iblock/d57/d5773eb1a43e5a8a0ef225e012e5c746.pdf> (accessed December 11, 2018).
- [7] Dobrolensky Yu.P., Ivanov V.I., Pospelov G.S. *Avtomatika upravlyaemykh snaryadov* [Automation of guided projectiles]. Moscow, Oborongiz Publ., 1963, 548 p.
- [8] Antanevich, A.A., Ikuas, Yu.F., Lobaty, A.A. *Vestnik BNTU — Bulletin of the Belarusian National Technical University*, 2010, no. 5, pp. 37–40. Available at: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/1420/37-40.pdf> (accessed December 11, 2018).
- [9] Cook R., Palacios-Nieto R., Goulart P. J. *AIAA Journal*, 2013, vol. 51, no. 2, pp. 330–340.
- [10] Besekersky V.A., Popov E.P. *Teoria system avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. St. Petersburg, Professia Publ., 2003, 752 p.

Plavnik G.G., Cand. Sc. (Eng.), Chief Research Scientist, JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”, Assoc. Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 15 research publications in the field of aircraft dynamics and stabilization systems. Research interests: flight dynamics, control of UAV. e-mail: tochilov@vpk.npomash.ru

Tochilova O.L., Engineer of the 1st category, JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”. Author of 4 research publications in the field of aircraft motion dynamics. Research interests: flight dynamics, control of UAV, wavelet analysis. e-mail: forpoint@yandex.ru

Loshkarev A.N., Leading Engineer, JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”. Author of 4 research publications in the field of aircraft flight dynamics and control. Research interests: flight dynamics, control of UAV. e-mail: loshkarev_an@mail.ru