

АВТОПИЛОТ ДЛЯ ЛЕГКОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Д.А. Летунов, А.Т. Кизимов, М.А. Лебедев

Рассмотрен автопилот с бесплатформенной инерциальной курсовертикалью, обеспечивающий эффективную стабилизацию лёгкого беспилотного летательного аппарата в турбулентной атмосфере. Приведены передаточные функции и частотные характеристики летательного аппарата, непрерывной и дискретной частей канала крена автопилота. Исследованы частотные характеристики и спектры колебаний летательного аппарата по углу крена.

Ключевые слова: автопилот, легкий беспилотный летательный аппарат, курсовертикаль, передаточная функция, частотная характеристика, спектр.

ВВЕДЕНИЕ

Турбулентное движение воздушных масс оказывает значительное влияние на полет лёгкого беспилотного летательного аппарата (ЛБЛА). Атмосферная турбулентность служит источником дополнительных аэродинамических сил и моментов, существенно влияющих на ориентацию летательного аппарата. Частичное совпадение частотных диапазонов амплитудно-частотных характеристик ЛБЛА и амплитудного спектра угловых скоростей турбулентности атмосферы приводит к неудовлетворительной динамике полета [1]. Внешние возмущающие воздействия не только не подавляются, но и усиливаются, что обуславливает интенсивные угловые колебания ЛБЛА. В этом случае применение установленной на борту видеоаппаратуры для мониторинга местности становится малоэффективным. Разрабатываемые легкие летательного аппарата являются «более высокочастотными» по сравнению с тяжелыми. Эффективность автопилотов на высоких частотах существенно ниже, поскольку быстродействие исполнительных механизмов достигло своего физического предела. Поэтому исследование частотных свойств и спектров колебаний актуально и имеет важное прикладное значение для обеспечения высоких показателей стабилизации ЛБЛА в турбулентной атмосфере и эффективного применения целевой аппаратуры.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Рассмотрим угловую ориентацию ЛБЛА в турбулентной атмосфере (рис. 1).

Входные и выходные физические величины ЛБЛА представим:

— вектором угловых скоростей вихрей турбулентной атмосферы $\Omega_T\{\omega_{XT}, \omega_{YT}, \omega_{ZT}\}$, где ω_{XT} , ω_{YT} и ω_{ZT} — угловые скорости относительно осей X , Y и Z связанной системы координат;

— вектором управляющих воздействий $\Delta\{\delta_\Theta, \delta_{PH}, \delta_{PB}\}$, где δ_Θ , δ_{PH} и δ_{PB} — углы отклонения элеронов, руля направления и руля высоты;

— вектором угловой ориентации ЛБЛА в нормальной системе координат $U\{\gamma, \psi, \vartheta\}$, где γ , ψ и ϑ — углы крена, рысканья и тангажа;

— вектором угловых скоростей ЛБЛА $\Omega\{\omega_X, \omega_Y, \omega_Z\}$, где ω_X , ω_Y и ω_Z — угловые скорости относительно осей X , Y и Z связанной системы координат.

На борту ЛБЛА установлены датчики угловых скоростей (ДУС), сигналы с которых обрабаты-

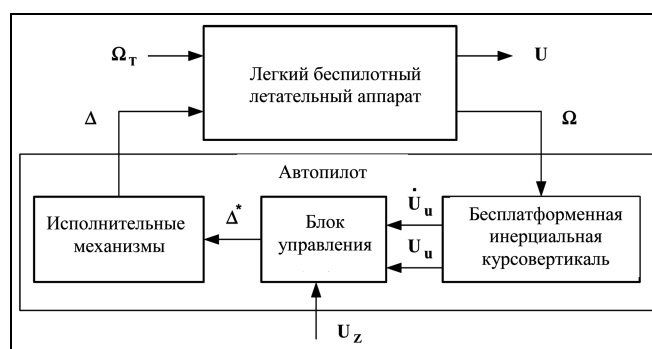


Рис. 1. Схема управления угловым положением летательного аппарата в турбулентной атмосфере

ются бесплатформенной инерциальной курсорвертикалью (БИКВ) [2]. Вычисляются вектор производных от углов ориентации

$$\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{u}} \{ \dot{\gamma}_{\text{и}}, \dot{\psi}_{\text{и}}, \dot{\vartheta}_{\text{и}} \} = \begin{bmatrix} \omega_{X\text{и}} - (\omega_{Y\text{и}} \cos \gamma - \omega_{Z\text{и}} \sin \gamma) \cdot \operatorname{tg} \vartheta \\ (\omega_{Y\text{и}} \cos \gamma - \omega_{Z\text{и}} \sin \gamma) / \cos \vartheta \\ \omega_{Y\text{и}} \sin \gamma + \omega_{Z\text{и}} \cos \gamma \end{bmatrix}$$

и вектор измеренных углов ориентации $\mathbf{U}_{\mathbf{u}} \{ \gamma_{\text{и}}, \psi_{\text{и}}, \vartheta_{\text{и}} \}$.

Блок управления (БУ) вычисляет рассогласование между измеренными углами ориентации $\mathbf{U}_{\mathbf{u}} \{ \gamma_{\text{и}}, \psi_{\text{и}}, \vartheta_{\text{и}} \}$ и заданными $\mathbf{U}_{\mathbf{z}} \{ \gamma_{\text{z}}, \psi_{\text{z}}, \vartheta_{\text{z}} \}$, реализует выбранный закон регулирования и формирует вектор управляющих сигналов $\Delta^* \{ \delta_{\vartheta}^*, \delta_{\text{РН}}^*, \delta_{\text{РВ}}^* \}$ для исполнительных механизмов (ИМ) элеронов.

На первом этапе исследования выполнена линеаризация и декомпозиция ЛБЛА и автопилота.

Выделены независимые каналы автопилота. Исследования выполнены для канала крена как наиболее критичного при полёте в турбулентной атмосфере (рис. 2).

Получены непрерывные передаточные функции ЛБЛА при воздействии вихрей турбулентной атмосферы относительно оси X $W_{\omega_{XT}}^{\omega_X}(s)$, $W_{\omega_{XT}}^{\omega_Y}(s)$ и при управлении элеронами $W_{\delta_{\vartheta}}^{\omega_X}(s)$, $W_{\delta_{\vartheta}}^{\omega_Y}(s)$. Фактический угол крена γ формируется в соответствии с выражениями

$$\gamma = (\omega_X - \omega_Y \operatorname{tg} \vartheta) / s,$$

$$\omega_X = W_{\omega_{XT}}^{\omega_X}(s) \omega_{XT} + W_{\delta_{\vartheta}}^{\omega_X}(s) \delta_{\vartheta},$$

$$\omega_Y = W_{\omega_{XT}}^{\omega_Y}(s) \omega_{XT} + W_{\delta_{\vartheta}}^{\omega_Y}(s) \delta_{\vartheta}.$$

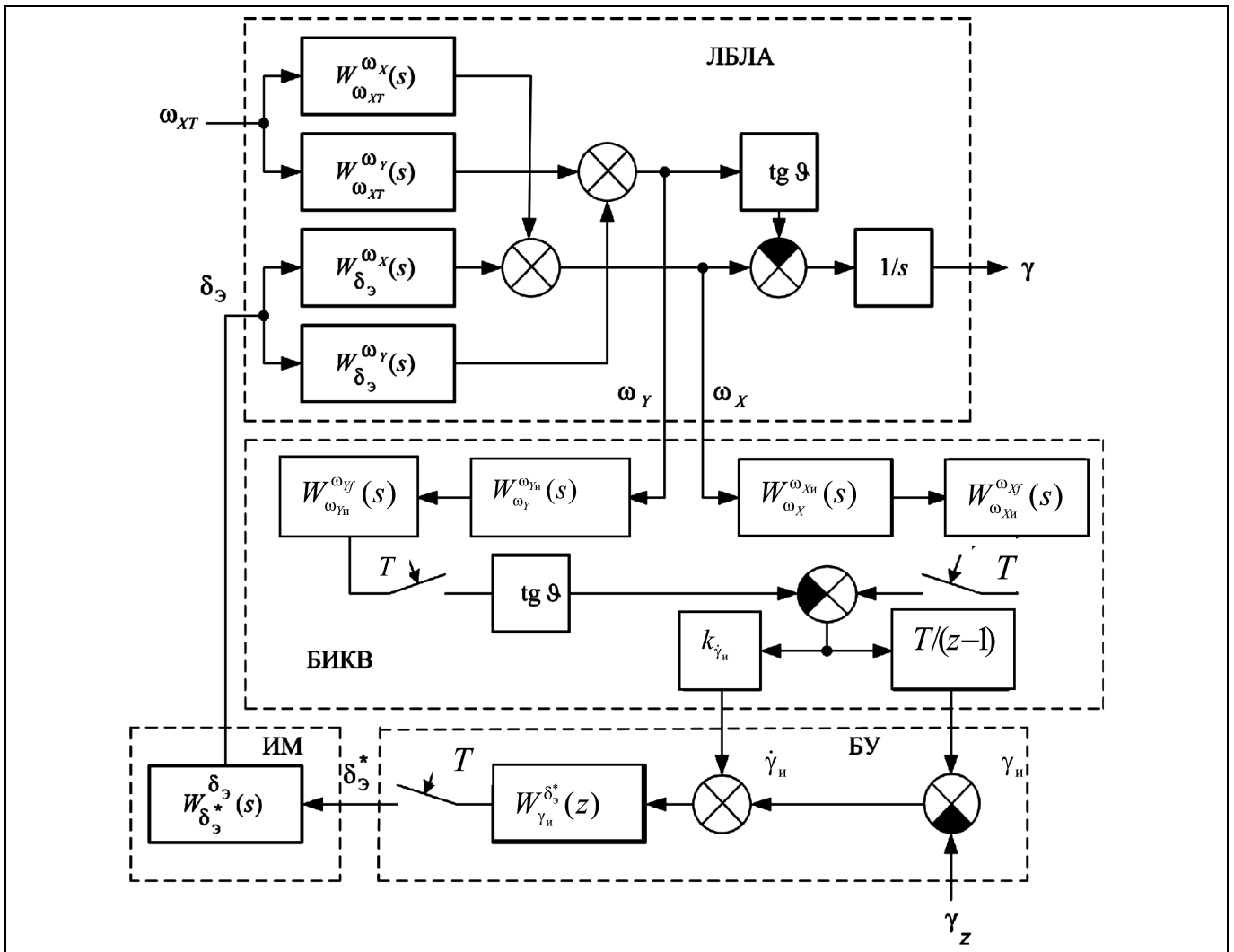


Рис. 2. Структурная схема канала крена



В БИКВ угловые скорости ω_X и ω_Y измеряются ДУС с передаточными функциями $W_{\omega_X}^{\omega_{Xn}}(s) = W_{\omega_Y}^{\omega_{Yn}}(s)$. Выходные сигналы ДУС пропускаются через аналоговые фильтры с передаточными функциями $W_{\omega_{Xn}}^{\omega_{Xf}}(s) = W_{\omega_{Yn}}^{\omega_{Yf}}(s)$, которые обеспечивают подавление высокочастотных составляющих сигналов на входах аналого-цифровых преобразователей (АЦП) при минимальных дополнительных фазовых сдвигах в полосе пропускания разомкнутого контура автопилота. Установка аналоговых фильтров снижает дополнительную погрешность цифрового преобразования, зависящую от уровня шума на частотах, кратных частоте дискретизации АЦП. Измеренный угол крена γ_n и его производная $\dot{\gamma}_n$ с коэффициентом $k_{\dot{\gamma}_n}$ вычисляются цифровой частью БИКВ с периодом дискретизации T . Цифровой блок управления вычисляет угловое рассогласование, вводит производную от измеренного угла крена, преобразует цифровой код в соответствии с дискретной передаточной функцией $W_{\gamma_n}^{\delta_{\Delta}^*}(z)$ и формирует импульсный сигнал δ_{Δ}^* . Исполнительные механизмы с передаточной функцией $W_{\delta_{\Delta}^*}^{\delta_{\Delta}}(s)$ преобразуют импульсный сигнал в угол отклонения элеронов δ_{Δ} ЛБЛА.

В результате выполнения структурных преобразований канала крена получены передаточные функции:

— ЛБЛА без автопилота при воздействии турбулентной атмосферы

$$W_{\omega_{XT}}^{\gamma}(s) = [W_{\omega_{XT}}^{\omega_X}(s) - W_{\omega_{XT}}^{\omega_Y}(s)\text{tg}\vartheta]/s; \quad (1)$$

— разомкнутой системы стабилизации измеренного угла крена

$$W_{\gamma_n}^{\gamma} = W_{\gamma_n}^{\delta_{\Delta}^*}(z) W_{\delta_{\Delta}^*}^{\delta_{\Delta}}(s) W_{\omega_X}^{\omega_{Xn}}(s) W_{\omega_{Xn}}^{\omega_{Xf}}(s) \times [W_{\delta_{\Delta}}^{\omega_X}(s) - W_{\delta_{\Delta}}^{\omega_Y}(s)\text{tg}\vartheta](k_{\dot{\gamma}} + T/(z-1)); \quad (2)$$

— замкнутой системы стабилизации измеренного угла крена при отсутствии воздействия турбулентной атмосферы

$$\Phi^{\gamma_n} = 1/(1 - W_{\gamma_n}^{\gamma}). \quad (3)$$

Автопилот стабилизирует измеренный угол крена, а исследования выполняются для фактического угла крена, поэтому измеренный угол крена необходимо привести к фактическому. Запишем выражения для фактического и измеренного углов

крена при некотором общем для указанных величин воздействии, например, отклонении элеронов:

$$\gamma = \Phi^{\gamma_n} [W_{\omega_{XT}}^{\omega_X}(s) - W_{\omega_{XT}}^{\omega_Y}(s)\text{tg}\vartheta]\delta_{\Delta}/s;$$

$$\gamma_n = \Phi^{\gamma_n} W_{\omega_X}^{\omega_{Xn}}(s) W_{\omega_{Xn}}^{\omega_{Xf}}(s) \times [W_{\delta_{\Delta}}^{\omega_X}(s) - W_{\delta_{\Delta}}^{\omega_Y}(s)\text{tg}\vartheta]\delta_{\Delta}(T/(z-1)).$$

Выразим измеренный угол крена через фактический и запишем передаточную функцию связи этих переменных

$$W_{\gamma_n}^{\gamma} = 1/[W_{\omega_X}^{\omega_{Xn}}(s) W_{\omega_{Xn}}^{\omega_{Xf}}(s)(T/(z-1))s]. \quad (4)$$

Приведем передаточную функцию замкнутой системы стабилизации измеренного угла крена к замкнутой системе стабилизации фактического угла крена:

$$\Phi^{\gamma} = \Phi^{\gamma_n} W_{\gamma_n}^{\gamma}. \quad (5)$$

При воздействии на ЛБЛА турбулентной атмосферы и стабилизации угла крена автопилотом необходимо оба воздействия привести к единому выходу, например, к измеренному углу крена, а затем результат привести к фактическому углу крена. После преобразований получим передаточную функцию ЛБЛА с автопилотом для фактического угла крена при воздействии турбулентной атмосферы

$$\Phi_{\omega_{XT}}^{\gamma} = \Phi^{\gamma_n} [W_{\omega_{XT}}^{\omega_X}(s) - W_{\omega_{XT}}^{\omega_Y}(s)\text{tg}\vartheta]/s. \quad (6)$$

Для вычисления амплитудно-фазовых характеристик (АФХ) необходимо в дискретной части передаточных функций сделать замену

$$z = \frac{2/T + w}{2/T - w}$$

и перейти к функциям комплексного переменного: $w \rightarrow j\omega^*$; $s \rightarrow j\omega$, где ω^* — псевдочастота, ω — круговая частота.

Известно [3], что псевдочастота соответствует круговой частоте с погрешностью не более 5 % при выполнении условия [4] $\omega T/2 < 0,5$.

Используя выражения (1)–(6), запишем АФХ:

— ЛБЛА без автопилота по углу крена при воздействии турбулентной атмосферы

$$W_{\omega_{XT}}^{\gamma}(j\omega) = [W_{\omega_{XT}}^{\omega_X}(j\omega) W_{\omega_{XT}}^{\omega_Y}(j\omega)\text{tg}\vartheta]/j\omega; \quad (7)$$

— разомкнутой системы стабилизации измеренного угла крена

$$W^{\gamma_{\text{и}}}(j\omega) = W_{\gamma_{\text{и}}}^{\delta_{\text{э}}}^*(j\omega) W_{\delta_{\text{э}}}^{\delta_{\text{э}}}^*(j\omega) W_{\omega_X}^{\omega_{X\text{и}}}(j\omega) W_{\omega_{X\text{и}}}^{\omega_{Xf}}(j\omega) \times \\ \times [W_{\delta_{\text{э}}}^{\omega_X}(j\omega) - W_{\delta_{\text{э}}}^{\omega_Y}(j\omega) \text{tg}\vartheta](k_{\gamma} + 1/(j\omega) - T/2);$$

— замкнутой системы стабилизации измеренного угла крена при отсутствии воздействия турбулентной атмосферы

$$\Phi^{\gamma_{\text{и}}}(j\omega) 1/(1 - W^{\gamma_{\text{и}}}(j\omega));$$

— преобразования измеренного угла крена в фактический

$$W_{\gamma_{\text{и}}}^{\gamma}(j\omega) = \\ = 1/[W_{\omega_X}^{\omega_{X\text{и}}}(j\omega) W_{\omega_{X\text{и}}}^{\omega_{Xf}}(j\omega)(1/(j\omega) - T/2)j\omega];$$

— замкнутой системы стабилизации угла крена ЛБЛА при отсутствии воздействия турбулентной атмосферы

$$\Phi^{\gamma}(j\omega) = \Phi^{\gamma_{\text{и}}}(j\omega) W_{\gamma_{\text{и}}}^{\gamma}(j\omega); \quad (8)$$

— ЛБЛА с автопилотом для фактического угла крена при воздействии турбулентной атмосферы

$$\Phi_{\omega_{Xf}}^{\gamma}(j\omega) = \\ = \Phi^{\gamma_{\text{и}}}(j\omega)[W_{\omega_{Xf}}^{\omega_X}(j\omega) - W_{\omega_{Xf}}^{\omega_Y}(j\omega) \text{tg}\vartheta]/j\omega. \quad (9)$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование частотных свойств выполнено для ЛБЛА массой 60 кг, размахом крыла 3,05 м при полёте на высоте 300 м со скоростью 40 м/с в турбулентной атмосфере средней интенсивности. Получены амплитудно-фазовые характеристики ЛБЛА по угловым скоростям ω_X и ω_Y :

— при воздействии турбулентной атмосферы относительно оси X

$$W_{\omega_{Xf}}^{\omega_X}(j\omega) = \\ = \frac{-32,225(j\omega)^3 - 75,175(j\omega)^2 - 283,862j\omega + 3,083}{(j\omega)^4 + 34,52(j\omega)^3 + 94,472(j\omega)^2 + 378,246j\omega + 135,704}, \\ W_{\omega_{Xf}}^{\omega_Y}(j\omega) = \\ = \frac{0,295(j\omega)^3 + 0,058(j\omega)^2 + 12,574j\omega + 66,107}{(j\omega)^4 + 34,52(j\omega)^3 + 94,472(j\omega)^2 + 378,246j\omega + 135,704};$$

— при управлении элеронами

$$W_{\delta_{\text{э}}}^{\omega_X}(j\omega) = \\ = \frac{-415,249(j\omega)^3 - 953,097(j\omega)^2 - 2575,128j\omega + 27,499}{(j\omega)^4 + 34,520(j\omega)^3 + 94,472(j\omega)^2 + 378,246j\omega + 135,704}, \\ W_{\delta_{\text{эп}}}^{\omega_Y}(j\omega) = \\ = \frac{-122,713(j\omega)^2 + 88,233j\omega + 589,671}{(j\omega)^4 + 34,520(j\omega)^3 + 94,472(j\omega)^2 + 378,246j\omega + 135,704}.$$

В качестве ДУС применены волоконно-оптические гироскопы с АФХ

$$W_{\omega_X}^{\omega_{X\text{и}}}(j\omega) = W_{\omega_Y}^{\omega_{Y\text{и}}}(j\omega) = 1/(5 \cdot 10^{-4}j\omega + 1).$$

Предварительная обработка сигналов на входе АЦП выполнена аналоговыми фильтрами второго порядка с АФХ

$$W_{\omega_{Y\text{и}}}^{\omega_{Yf}}(j\omega) = W_{\omega_{X\text{и}}}^{\omega_{Xf}}(j\omega) = 1/(3,6 \cdot 10^{-5}(j\omega)^2 + 0,012 + 1).$$

Дальнейшие вычисления производятся цифровой частью автопилота с шагом дискретизации $T = 0,01$ с. Блок управления формирует изодромное регулирование без коррекции и с коррекцией по производной, вычисленной БИКВ. Выбираются согласованные значения коэффициентов усиления по производной и пропорциональной части изодрома

$$W_{\gamma_{\text{и}}}^{\delta_{\text{э}}}^*(j\omega) = k + 0,1(1/(j\omega) - T/2).$$

При отсутствии коррекции по производной коэффициент усиления изодрома $k = 0,29$, что обеспечивает запас устойчивости автопилота по фазе 50° . Такой же запас устойчивости достигается с коррекцией по производной $k_{\gamma} = 0,18$ с и коэффициентом усиления изодрома $k = 0,5$. Частота среза разомкнутого контура автопилота выбирается максимально возможной, чтобы обеспечить наиболее широкую полосу частот подавления воздействия турбулентной атмосферы.

Цифровая часть автопилота разделена на две части. Одна из них находится в БИКВ, вторая — в блоке управления. Анализ АФХ показывает, что цифровым вычислениям сопутствует чистое запаздывание, равное половине шага дискретизации. Полное запаздывание сигнала в автопилоте равно шагу дискретизации.

Аналоговое управление элеронами формируется исполнительными механизмами с АФХ

$$W_{\delta_{\text{э}}}^{\delta_{\text{э}}}^*(j\omega) = 1/(0,008(j\omega)^2 + 0,147j\omega + 1).$$

По АФХ (7)—(9) построены амплитудно-частотные характеристики, представленные на рис. 3. Характеристики показывают: ЛБЛА является фильтром нижних частот, т. е. подавляет высокочастотные внешние воздействия; автопилот — фильтром верхних частот, т. е. подавляет низкочастотные внешние воздействия; ЛБЛА с автопилотом — полосовым фильтром, т. е. наименее подавляет внешние возмущающие воздействия в диапазоне частот от 0,1 до 11 рад/с (от 0,016 до 1,75 Гц). Эф-

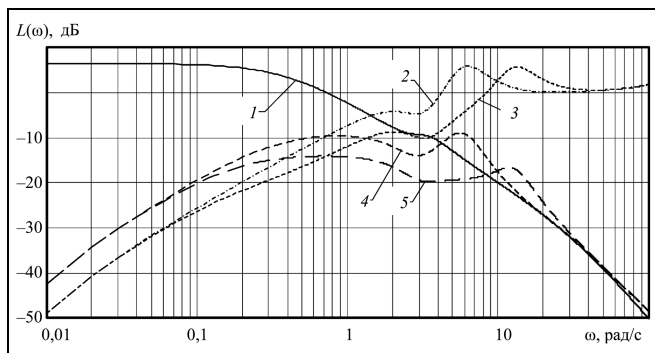


Рис. 3. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики канала крена: 1 — ЛБЛА без автопилота; 2 — автопилота без коррекции по производной; 3 — автопилота с коррекцией по производной; 4 — ЛБЛА с автопилотом без коррекции по производной; 5 — ЛБЛА с автопилотом и коррекцией по производной

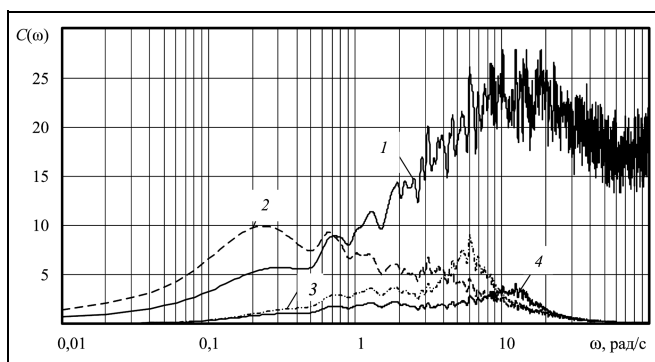


Рис. 4. Амплитудные спектры $C(\omega)$ исследуемых объектов: 1 — турбулентной атмосферы по угловой скорости, град/с; 2 — ЛБЛА по углу крена без автопилота, град; 3 — ЛБЛА по углу крена с автопилотом без коррекции по производной, град; 4 — ЛБЛА по углу крена с автопилотом и коррекцией по производной, град

эффективное подавление внешних воздействий возможно при большем перекрытии частотных диапазонов фильтров. Из приведенных вариантов наиболее эффективен ЛБЛА с автопилотом и коррекцией по производной. Наименьшее затухание в 14 дБ обеспечивается на частоте 0,16 рад/с (0,025 Гц).

Наиболее распространенной характеристикой турбулентной атмосферы служит спектральная плотность мощности по угловым скоростям. С ее помощью оценивается воздействие вихрей, соизмеримых с размерами ЛБЛА, на заданной высоте и скорости полета. Для вычислений использовалась модель турбулентности атмосферы Кармана. Выполнено преобразование спектральной плотности мощности турбулентности атмосферы в амплитудный спектр и его преобразование в соответствующие амплитудные спектры по углу крена [1] (рис. 4).

Из приведенных характеристик следует, что наибольшая амплитуда турбулентного воздействия атмосферы на ЛБЛА рассматриваемого класса приходится на

частоты от 10 до 11 рад/с (от 1,59 до 1,75 Гц). Собственно ЛБЛА эффективно гасит колебания по крену на высоких частотах, однако на частоте 0,115 рад/с (0,018 Гц) амплитуда колебаний достигает 10° . Подавление колебаний автопилотом без коррекции уменьшает максимальную амплитуду колебаний до 8° , но частота увеличивается до 6 рад/с (0,95 Гц). Введение коррекции по производной повышает эффективность автопилота. Максимальная амплитуда колебаний снижается до 3° на частоте 10,3 рад/с (1,64 Гц).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования поведения легкого беспилотного летательного аппарата в турбулентной атмосфере показывают, что для эффективного подавления угловых колебаний необходимо обеспечивать максимальное перекрытие частотных диапазонов собственно аппарата как фильтра нижних частот и автопилота как фильтра верхних частот. Удовлетворительные частотные характеристики не гарантируют минимальной амплитуды угловых колебаний летательного аппарата в турбулентной атмосфере. Необходим спектральный анализ его колебаний в достаточно широком диапазоне частот. При этом следует помнить, что автопилот повышает собственную частоту летательного аппарата, т. е. перемещает ее в область наиболее интенсивных внешних воздействий. Высокие собственные частоты отрицательно сказываются на работе установленной на борту целевой аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кизимов А.Т., Фролова Л.Е. Стабилизация малоразмерного беспилотного летательного аппарата в турбулентной атмосфере // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2007. — Т. 5, № 12. — С. 8–12.
2. Пат. 2249791 РФ. Бесплатформенная инерциальная курсовертикаль / Д.Р. Березин, А.Т. Кизимов, С.М. Алексеев и др. // Опубл. 10.04.2005. Бюл. № 10.
3. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика — М.: Высшая школа, 1990. — 335 с.
4. Летунов Д.А., Кизимов А.Т., Лебедев М.А. Исследование эффективности стабилизации легкого беспилотного летательного аппарата в турбулентной атмосфере // Вестник Рыбинской гос. авиац. технолог. академии им. П.А. Соловьёва. — 2010. — № 3 (18). — С. 184–189.

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

Летунов Дмитрий Александрович — аспирант,
✉ letunovd@inbox.ru,

Кизимов Алексей Тимофеевич — канд. техн. наук, доцент,

Лебедев Михаил Александрович — аспирант,
✉ lebedev_oct@mail.ru,

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьёва,
✉ root@rgata.ru, ☎ (4855) 22-28-37.