



Е.О. Арискин, Р.А. Лисин, М.Р. Миннебаев

## ТЕХНОЛОГИЯ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРА ВЕТРА НА БОРТУ ВЕРТОЛЕТА С ИОННО-МЕТОЧНЫМИ И АЭРОМЕТРИЧЕСКИМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ\*

(Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ)

Одним из направлений разработки системы измерения параметров вектора ветра на борту вертолета является использование аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта, воспринимаемой неподвижным приемником с ионно-меточными и аэрометрическими измерительными каналами [1, 2].

Операторную чувствительность ионно-меточных измерительных каналов рассматриваемой системы измерения параметров вектора ветра на борту вертолета можно представить в виде [3]

$$W_{ИМ}(p) = \frac{e^{-\tau_w p}}{(T_1 p + 1)(T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1)} = \frac{e^{-\tau_w p}}{T_1 T_3^2 p^3 + (T_3 + 2\xi T_1 T_3) p^2 + (T_1 + 2\xi T_3) p + 1}, \quad (1)$$

где  $\tau_w$  - время пролета ионной метки от искрового разрядника до приемных электродов, которая обратно пропорциональна измеряемой скорости ветра ( $\tau_w = \frac{R}{W}$ );  $T_1$  – постоянная времени канала выделения и преобразования информативных сигналов измерительной системы;  $T_2$  и  $\xi$  – постоянная времени и показатель затухания вычислительного устройства, формирующего выходные сигналы по скорости и углу направления ветра.

Операторная чувствительность  $W_{АМ}(p)$  аэрометрических измерительных каналов системы будет иметь вид [4]

$$W_{АМ}(p) = \frac{e^{-\tau_{п} p}}{(T_2 p + 1)(T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1)} = \frac{e^{-\tau_{п} p}}{T_2 T_3^2 p^3 + (T_3 + 2\xi T_2 T_3) p^2 + (T_2 + 2\xi T_3) p + 1}, \quad (2)$$

При известном (детерминированном) характере изменения полезных сигналов и внешних помех результирующая динамическая погрешность ионно-меточных и аэрометрических измерительных каналов системы контроля скорости ветра  $W$  можно представить в операторной форме

$$\Delta W_{ИМ}(p) = [W_{ИМ}(p) - 1]X(p) + W_{ИМ}(p)\xi_{ИМ}(p) = \Delta W_{ИМС}(p) + \Delta W_{ИМВ}(p); \quad (3)$$

$$\Delta W_{АМ}(p) = [W_{АМ}(p) - 1]X(p) + W_{АМ}(p)\xi_{АМ}(p) = \Delta W_{АМС}(p) + \Delta W_{АМВ}(p),$$

где  $X(p)$  – изображение изменения во времени измеряемой скорости ветра  $W(t)$ ;  $\xi_{ИМ}(p)$  и  $\xi_{АМ}(p)$  – изображения входных возмущений ионно-меточного и аэрометрического измерительных каналов;  $\Delta W_{ИМ}(p)$ ,  $\Delta W_{АМ}(p)$ ,  $\Delta W_{ИМС}(p)$ ,  $\Delta W_{АМС}(p)$ ,  $\Delta W_{ИМВ}(p)$  и  $\Delta W_{АМВ}(p)$  – изображения собственной и вынужденной

\* Работа выполнена по гранту РФФИ №18-38-00187



составляющих динамических погрешностей ионно-меточного и аэрометрического измерительных каналов.

Аналогично по каналу измеряемого угла направления вектора ветра будем иметь

$$\Delta\Psi_{ИМ}(p) = [W_{ИМ}(p) - 1]\Psi(p) + W_{ИМ}(p)\xi_{ИМ}(p) = \Delta\Psi_{ИМС}(p) + \Delta\Psi_{ИМБ}(p); \quad (4)$$

$$\Delta\Psi_{АМ}(p) = [W_{АМ}(p) - 1]\Psi(p) + W_{АМ}(p)\xi_{АМ}(p) = \Delta\Psi_{АМС}(p) + \Delta\Psi_{АМБ}(p),$$

где  $\Delta\Psi_{ИМ}(p)$ ,  $\Delta\Psi_{АМ}(p)$ ,  $\Delta\Psi_{ИМС}(p)$ ,  $\Delta\Psi_{АМС}(p)$ ,  $\Delta\Psi_{ИМБ}(p)$  и  $\Delta\Psi_{АМБ}(p)$  – изображения результирующей, собственной и вынужденной составляющих динамических погрешностей ионно-меточного и аэрометрического каналов угла направления вектора ветра  $\Psi(t)$ ;  $\Psi(p)$  – изображение изменения во времени угла направления вектора ветра.

При скачкообразном изменении скорости ветра  $W(t) = W_0 1[t]$  или угла направления ветра  $\Psi(t) = \Psi_0 1[t]$  выражение для собственной динамической погрешности измерительных каналов, например аэрометрического будет иметь вид

$$\Delta W_c(t) = -W_0 \left\{ \frac{k_2^2 + \omega_0^2}{(k_1 - k_2)^2 + \omega_0^2} e^{-k_1 t} + \left[ \frac{k_1(k_1 - 2k_2)}{(k_1 - k_2)^2 + \omega_0^2} \cos \omega_0 t - \frac{k_1(\omega_0^2 - k_2^2 - k_1 k_2)}{\omega_0(k_1 - k_2)^2 + \omega_0^2} \sin \omega_0 t \right] e^{-k_1 t} \right\};$$

$$\Delta \Psi_c(t) = -\Psi_0 \left\{ \frac{k_2^2 + \omega_0^2}{(k_1 - k_2)^2 + \omega_0^2} e^{-k_1 t} + \left[ \frac{k_1(k_1 - 2k_2)}{(k_1 - k_2)^2 + \omega_0^2} \cos \omega_0 t - \frac{k_1(\omega_0^2 - k_2^2 - k_1 k_2)}{\omega_0(k_1 - k_2)^2 + \omega_0^2} \sin \omega_0 t \right] e^{-k_1 t} \right\}. \quad (5)$$

При сложных законах изменения параметров вектора ветра собственные динамические погрешности измерительных каналов, например канала угла направления вектора ветра определяется с использованием коэффициентов динамической погрешности [5] в виде

$$\Delta\Psi_c(t) = c_0 \Psi(t) + c_1 \dot{\Psi}(t) + c_2 \ddot{\Psi}(t) + \dots + c_n \overset{n}{\Psi}(t), \quad (6)$$

где  $c_0, c_1, c_2, \dots, c_n$  – коэффициенты динамической погрешности, которые определяются по операторной чувствительности измерительного канала, например ионно-меточного как

$$c_0 = (W_{ИМ}(p) - 1)|_{p=0}; c_1 = \frac{d}{dt} (W_{ИМ}(p) - 1)|_{p=0}; \dots c_n = \frac{1}{n!} \frac{d^n}{dt^n} (W_{ИМ}(p) - 1)|_{p=0}; \quad (7)$$

В общем случае скорость  $W$  и угол  $\Psi$  направления вектора ветра  $W(t)$  являются случайной функцией времени. В качестве показателя динамической точности измерительных каналов системы контроля параметров вектора ветра на борту вертолета используется дисперсия собственной и вынужденной составляющих динамической погрешности.

При известной спектральной плотности мощности  $S_X(\omega)$  контролируемых параметров вектора ветра дисперсия собственной динамической погрешности измерительных каналов, например ионно-меточных будут определяться из выражений вида



$$\sigma_{\Delta Wc}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{IK}(j\omega) - 1|^2 S_W(\omega) d\omega; \quad \sigma_{\Delta \Psi c}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{IK}(j\omega) - 1|^2 S_\Psi(\omega) d\omega. \quad (8)$$

где  $S_W(\omega)$  и  $S_\Psi(\omega)$  – спектральные плотности мощности стационарных случайных процессов изменения скорости  $W(t)$  и угла направления  $\Psi(t)$  вектора ветра на данном режиме эксплуатации вертолета, которые определяются по результатам статистических исследований эксплуатации данного класса вертолетов.

Внешние случайные помехи, действующие на измерительные каналы системы контроля параметров вектора ветра на борту вертолета обусловлены в основном атмосферной турбулентностью и флуктуационными составляющими потока вихревой колонны несущего винта, обусловленными маховыми движениями лопастей и работой автомата перекоса [4].

Атмосферная турбулентность имеет весьма широкий спектр частот, и может быть аппроксимирована «белым шумом» со спектральной плотностью мощности  $S_{\xi T}(\omega) = S_T = const$ . Возмущения, вызываемые флуктуационными составляющими потока вихревой колонны несущего винта можно оценить спектральной плотностью мощности  $S_{\xi \Phi}(\omega)$  вида [3]

$$S_{\xi \Phi}(\omega) = \frac{2\sigma_\Phi^2 a_1}{\pi} \cdot \frac{a_1^2 + b_1^2}{(\omega^2 + a_1^2 - b_1^2)^2 + 4a_1^2 \omega^2}. \quad (9)$$

Тогда дисперсии вынужденных динамических погрешностей аэрометрических измерительных каналов системы контроля параметров вектора ветра на борту вертолета будут определяться выражениями

$$\sigma_{\Delta WB}^2 = \frac{S_T}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{AK}(j\omega)|^2 d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{AK}(j\omega)|^2 S_{\xi \Phi}(\omega) d\omega; \quad (10)$$

$$\sigma_{\Delta \Psi B}^2 = \frac{S_T}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi_{AK}(j\omega)|^2 d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi_{AK}(j\omega)|^2 S_{\xi \Phi}(\omega) d\omega.$$

Дисперсии результирующей динамической погрешности измерительных каналов системы контроля параметров вектора ветра на борту вертолета для аэрометрических каналов будут определяться как

$$\sigma_{\Delta W}^2 = \sigma_{\Delta WC}^2 + \sigma_{\Delta WB}^2; \quad \sigma_{\Delta \Psi}^2 = \sigma_{\Delta \Psi C}^2 + \sigma_{\Delta \Psi B}^2. \quad (11)$$

Из выражений (8) – (11) следует, что при известных спектральных плотностях мощности входных сигналов и действующих помех для снижения собственных динамических погрешностей измерительных каналов системы контроля параметров вектора ветра на борту вертолета необходимы операторные чувствительности ионно-меточного и аэрометрического измерительных каналов приближать к единице, а для уменьшения вынужденных составляющих динамических погрешностей каналов в области частот, где действуют помехи, приближать к нулю, что определяют постановку задачи синтеза по критерию динамической точности при случайных воздействиях, в частности с использованием оптимального линейного фильтра Винера [5].



Таким образом, полученные результаты исследования позволяют обоснованно проводить анализ динамической точности измерительных каналов системы контроля параметров вектора ветра на борту вертолета на основе неподвижного приемника с ионно-меточными и аэрометрическими измерительными каналами, решать задачи повышения точности при детерминированных и случайных воздействиях с использованием принципов оптимальной фильтрации и комплексирования.

### Литература

1. Патент РФ на изобретение №2587389, МПКG01P5/14. Бортовая система измерения параметров вектора скорости ветра на стоянке, стартовых и взлетно-посадочных режимах / В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, Ф.А. Ганеев, Е.О. Арискин, Н.Н. Макаров, В.П. Деревянкин, О.И. Кузнецов, Д.А. Истомин. Заявл. 10.12.2014. Опубл. 2016. Бюл. №17.
2. Арискин Е.О. Построение и алгоритмы системы контроля воздушных параметров полета и окружающей среды на борту вертолета с ионно-меточными и аэрометрическими измерительными каналами / Е.О. Арискин, М.Р. Миннебаев, А.В. Никитин, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. №3(329). С.150-157.
3. Ганеев Ф.А. Ионно-меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости с логометрическими информативными сигналами и интерполяционной схемой обработки / Ганеев Ф.А., Солдаткин В.М. // Известия вузов. Авиационная техника. 2010. №3. С.46-50.
4. Солдаткин В.В. Система воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного аэрометрического приемника и информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта / В.В. Солдаткин: Монография. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. 284 с.
5. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных устройств. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.