

Казак В.Н., д-р техн. наук
Лейва Каналес Максимо

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПНО МАГИСТРАЛЬНОГО САМОЛЕТА

Аэрокосмический институт
Национального авиационного университета

Предложена методика определения характеристик состояния ВСУП цифрового пилотажно-навигационного комплекса ВС, а также вероятностей переходов из состояния в состояние

Введение

Повышение сложности цифровых систем пилотажно-навигационного оборудования (ПНО), обусловленное расширением круга решаемых задач, а также объективными тенденциями развития науки, техники и технологий приводит к возрастанию доли множественных отказов на общем фоне факторов неработоспособности оборудования воздушных судов (ВС). Выявление тенденции снижения эксплуатационной надежности систем ПНО требует наличия методики упреждающей оценки вектора состояний системы и вероятностей перехода из одного состояния в другое.

Целью статьи является изложение одного из подходов к построению методики определения характеристик эксплуатационной надежности вычислительной системы управления полетом (ВСУП) ВС, как основной составляющей его ПНО.

Методику определения характеристик эксплуатационной надежности ПНО магистрального самолета рассмотрим на примере его ВСУП, являющейся многорежимной динамической системой, у которой переходы из режима в режим происходят в случайные моменты времени. Такие системы принято называть системами со случайной структурой (ССС) или стохастическими логико-динамическими системами. Математическая модель цифровой системы управления полетом, в общем случае может быть представлена системой стохастических разностных уравнений:

$$\begin{aligned} I_{k+1} &= \chi_k(I_k, X_k, V'_k); \\ X_{k+1} &= a_k(I_k, X_k, V_k); \\ I_k &= \sigma_k(I_k, X_k, W'_k); \\ Y_k &= b(I_k, X_k, W_k), \end{aligned} \quad (1)$$

где $k = 0, 1, \dots, n$ – номер такта по времени; X_k – случайный непрерывный n -мерный вектор состояния ВСУП; $I_k \in \{1, 2, \dots, L\}$ – случайный номер одного из L возможных режимов работы ВСУП; Y_k – случайный непрерывный вектор измерений состояния ВСУП; $I_k \in \{1, 2, \dots, M\}$ – случайное целочисленное значение индикатора режима функционирования ВСУП; V'_k, V_k, W'_k, W_k – случайные, в общем случае негауссовские и зависящие между собой векторы дискретного белого шума с известной плотностью распределения; $a_k(\dots)$, $\chi_k(\dots)$, $b_k(\dots)$, $\sigma_k(\dots)$ – заданные, в общем случае нелинейные функции.

Начальные значения номера режима I_0 и вектора состояния X_0 являются случайными – они определяются вероятностью начального режима $P_0(I_0 = i)$ и условной плотностью вероятности случайного состояния $p_0^i(x)$.

Выполнение требований безопасности полетов в навигационном отношении обеспечивается при условии следования самолета в пределах движущегося по требуемой траектории в функции времени t условного параллелепипеда объема $\nu(t)$ с

вероятностью не выхода за его внешние границы (рис. 1):

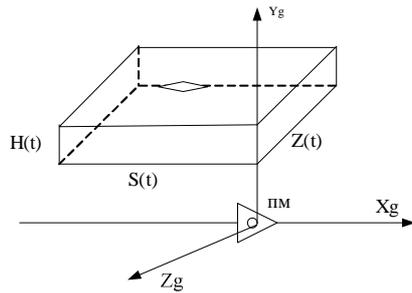


Рис. 1. Ограничения на траекторию горизонтального полета самолета

Вследствие ограничений диапазона скоростей полета, случайных изменений параметров внешней среды и внутренних процессов, а также необходимости обеспечить наиболее экономичные режимы полета по расходу топлива, функция точности полета самолета (выдерживания заданной траектории) (2) для различных этапов соответственно видоизменяется и конкретизируется.

$$\hat{O}(t) = P(Z(t), S(t), H(t) \subset v(t)) = \int_{-b}^b \int_{-a}^a \int_{-c}^c f(Z(t), S(t), H(t)) dZ(t) dS(t) dH(t). \quad (2)$$

Следовательно, критерием эффективности ПНО и процесса навигации является вероятность формирования комплексом безопасной пространственно-временной траектории полета [2, 3]:

$$E_H(t) = P_0(t)\delta_0(t)R_0(t) + \sum_{\alpha=1}^{k_1} (1 - P_{\alpha}^{q_{\alpha}}(t))P_1(t)\delta_1(t)R_1(t) + \sum_{\alpha,\beta=1}^{k_2} (1 - P_{\alpha}^{q_{\alpha}}(t))(1 - P_{\beta}^{q_{\beta}}(t))P_2(t)\delta_2(t)R_2(t) + \sum_{\alpha,\beta,\gamma=1}^{k_3} (1 - P_{\alpha}^{q_{\alpha}}(t))(1 - P_{\beta}^{q_{\beta}}(t))(1 - P_{\gamma}^{q_{\gamma}}(t))P_3(t)\delta_3(t)R_3(t) + \dots, \quad (3)$$

где $P_0(t), P_1(t), P_2(t), P_3(t)$ – вероятности безотказной работы за время полета t основных систем, участвующих в формировании траектории полета по высоте, направлению данными способами при отсутствии отказов ВСУП и при отказах α, β, γ – систем характеризующихся вероятностями безотказной работы $P_{\alpha}, P_{\beta}, P_{\gamma}$ и полной контролем, $q_{\alpha}, q_{\beta}, q_{\gamma}, \Phi_0(t), \Phi_1(t)$,

$\Phi_2(t), \Phi_3(t)$ – вероятность того, что при данных способах применения навигационного комплекса возможно реализовать требуемую точность процесса навигации (самолет не выходит за пределы параллелепипеда рис. 1); $R_0(t), R_1(t), R_2(t), R_3(t)$ – вероятности решения профессионально подготовленными пилотами при соответствующих способах использования ПНО с учетом их загруженности; $\sum_{\alpha=1}^{k_1}, \sum_{\beta=1}^{k_2}, \sum_{\gamma=1}^{k_3}$ –

суммы работоспособных состояний ПНО и при соответствующих $k_i, i=1,2,\dots$ способах его применения в отказах α, β, γ систем.

Критерий целевой эффективности ПНО в обеспечении безопасности полетов в навигационном отношении можно представить состоящим из начального его значения $E_0(t)$ и суммы составляющих его снижения $\Delta E_i(t)$, в частности, за счет снижения характеристик эксплуатационной надежности составляющих ПНО систем (на пример ВСУП):

$$E_H(t) = E_0(t) + \sum_{i=1}^k \Delta E_i(t). \quad (4)$$

Случайный процесс снижения характеристик эксплуатационной надежности рассмотрим на примере ВСУП как составляющей бортовой комплексной системы цифрового пилотажно-навигационного комплекса (БКС ЦПНО) самолета ИЛ-96-300. Процесс, протекающий в такой системе, заключается в том, что в последовательные моменты времени t_1, t_2, t_3, \dots система либо переходит из данного состояния в какое-либо другое из возможных состояний, либо остается в прежнем состоянии. Обозначим $X_i(k)$ событие, состоящее в том, что система (4) будет находиться в состоянии $X_i, i=1,2,\dots,n$, после k переходов.

После любого k -го перехода, события

$$X_1(k), X_2(k), \dots, X_n(k), \quad (5)$$

образуют полную группу несовместных событий. С учетом этого процесс, проте-

кающий в системе (5) можно представить как последовательность событий

$$X_1(0), X_2(1), X_3(2), X_4(3) \dots \quad (6)$$

Если допустить, что для любого шага вероятность перехода из состояния X_i в другое состояние X_j не зависит от того, когда и как система (5) пришла в состояние X_i , то последовательность событий (6) есть марковская цепь.

Используем марковскую цепь для анализа ВСУП. С каждым состоянием $X_i(k), i=1, \dots, n$ системы управления полетом после k -го шага свяжем элемент X_i марковской цепи $\{X_i\}$. Вероятности состояний назовем вероятности событий (6). Введем обозначения вероятностей этих событий

$$\begin{aligned} P_1(k) &= P(X_1(k)), P_2(k) = \\ &= P(X_2(k)), \dots, P_n(k) = P(X_n(k)), \end{aligned} \quad (7)$$

где $P_i(k)$ – вероятность того, что система (6) после k -го перехода (шага) находится в состоянии $X_i, i=1, 2, \dots, n$.

Учитывая несовместность событий, сумма вероятностей состояний ВСУП после k -го шага

$$\sum_{i=1}^n P_i(k) = 1,$$

равна единице, как вероятность суммы несовместных событий, образующих полную группу. Для любого перехода существуют вероятности перехода системы (6) из состояния X_i в другие состояния. Эти вероятности отличны от нуля, если система переходит из одного состояния в другое, и равны нулю, если на данном переходе система остается в прежнем состоянии. Если вероятности перехода марковской цепи не зависят от номера шага k , то такая марковская цепь называется однородной, если же вероятности перехода зависят от номера шага, то цепь называется неоднородной [2, 3].

Пусть возможные состояния ВСУП: X_1, X_2, \dots, X_n образуют однородную марковскую цепь. Вероятность перехода ВСУП из состояния X_i в состояние $X_j, i, j=1, 2, \dots, n$, обозначим P_{ij} . Полная вероятностная картина возможных состояний и переходов из состояния в состояние, в которых может прибывать ВСУП, задается прямоугольной матрицей P , составленной из вероятностей перехода:

$$P = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} \dots & P_{nn} \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Из (8) видно, что элементы матрицы по существу являются условными вероятностями

$$P_{ij} = P(X_j(k) / X_i(k-1)) \quad (9)$$

того, что после k -го шага система перешла в состояние X_j , при условии, что после предыдущего $(k-1)$ шага она находилась в состоянии $X_i, i=1, 2, \dots, n$. Сумма вероятностей, стоящих в каждой строке матрицы P

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1, \quad i=1, 2, \dots, n,$$

равна единице, т.к. в каком состоянии ни была ВСУП перед k -м шагом, после k -го шага она должна оказаться в одном из n несовместных состояний, образующих полную группу несовместных событий. На главной диагонали матрицы P стоят вероятности

$$P_{ii} = P(X_i(k) / X_i(k-1)), \quad (10)$$

того, что система управления полетом не выйдет из состояния X_i на следующем шаге. Если переходная вероятность $P_{ij} = 0$, то это означает, что на данном шаге ВСУП не может перейти из состояния X_i в состояние X_j .

Для облегчения составления матрицы вероятностей P состояний и переходов

ВСУП из состояния i в состояние j , построим ее размеченный граф состояний. Прежде всего, учтем то, что ВСУП имеет тройное резервирование. Это значит, что при комплексной обработке навигационной информации по мажоритарному принципу с помощью кворум элементов, вычисляемый несколькими средствами навигационный параметр усредняется и принимается за истинное значение. С этим значением сравниваются параметры каждого параллельного ВСУП.

Кворум элемент исключает дальнейшее прохождение параметра и формирует сигнал об отказе устройства (i -й комплект ВСУП, $i=1,2,3$), если выходной сигнал отличается от среднего на значение установленного допуска:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}.$$

Для повышения достоверности определения среднего значения параметра \bar{x} во ВСУП предварительно определяют частные расхождения в определении параметра:

$$\Delta x_{1,2} = |x_1 - x_2|, \Delta x_{2,3} = |x_2 - x_3|, \Delta x_{1,3} = |x_1 - x_3|. \quad (11)$$

Эти значения сравниваются с некоторым заранее заданным значением Δx_3 .

Если все частные расхождения (11) меньше Δx_3 , то формируется для использования осредненный параметр:

$$\bar{x} = 3^{-1}(x_1 + x_2 + x_3). \quad (12)$$

Очевидно, что ВСУП, имеющая тройное резервирование (12) с вероятностями безотказной работы P_1, P_2, P_3 , обеспечивает безотказную работу в целом до появления отказа в одной из трех составляющих:

$$P = P_1 P_2 P_3 + (1 - P_1) P_2 P_3 + (1 - P_2) P_1 P_3 + (1 - P_3) P_1 P_2,$$

с выдачей экипажу сигнала «Резерва нет».

Если же во ВСУП появился 2-ой отказ в одной из трех параллельных систем

$$Q = (1 - P_1)(1 - P_2) P_3 + (1 - P_2)(1 - P_3) P_1 + (1 - P_1)(1 - P_3) P_2 + (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3),$$

то система считается отказавшей в целом. С учетом абсолютной идентичности трех каналов ВСУП размеченный граф состояний можно представить:

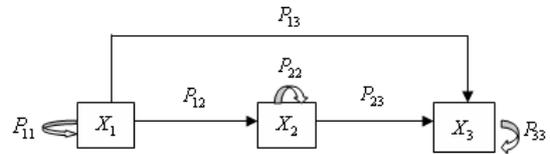


Рис. 2. Размеченный граф состояний ВСУП

Приняты следующие обозначения: $X_1 = P_1 P_2 P_3$ – исправное состояние ВСУП, имеющего резерв; $X_2 = P_1 P_2 (1 - P_3)$ или $P_1 P_3 (1 - P_2)$ или $P_2 P_3 (1 - P_1)$ – исправное состояние ВСУП, но не имеющего резерва; $X_3 = (1 - P_1)(1 - P_2) P_3$ или $(1 - P_1)(1 - P_3) P_2$ или $(1 - P_2)(1 - P_3) P_1$ или $(1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3)$ – система ВСУП отказала.

Требования ICAO к безотказности навигационного оборудования такие – ПНО должно обеспечивать вероятность безотказной работы 0,95 с достоверностью 0,9. Значение матрицы переходных вероятностей и начального состояния ВСУП дает возможность вычислить вероятности

$$P_1(k), P_2(k), \dots, P_n(k).$$

Составим матрицу переходных вероятностей для троекратно резервированной ВСУП

$$P = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что для вычисления вероятности состояний ВСУП в требуемый момент времени необходимо знать переходные вероятности P_{12}, P_{13}, P_{23} . Вычислим их с учетом требований ICAO и принятых в размеченном графе (рис. 2) обозначений состояний.

$$P_{12} = P_1 P_2 (1 - P_3) = 0,0451;$$

$$P_{13} = P_1 (1 - P_2)(1 - P_3) = 0,0024;$$

$$P_{23} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3) = 0,9976$$

Пусть, например, ВСУП находится перед первым шагом в состоянии X_m , $m = 1, 2, \dots, n$. Тогда для начального момента времени $t_0 \in [t_0, t_k]$ вероятности состояний системы равны:

$$\begin{aligned} P_1(0) = 0; P_2(0) = 0, \dots, P_m(0) = 1, \\ P_{m+1}(0) = 0; P_{m+2}(0) = 0, \dots, P_n(0) = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

После первого шага ВСУП может оставаться в прежнем состоянии X_m или перейти в любое другое. Вероятности таких переходов равны: $P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mm}, \dots, P_{mn}$. И составят m -ую строку матрицы P (13) переходных вероятностей. Вероятности состояний ВСУП после первого перехода будут равны:

$$\begin{aligned} P_1(1) = P_{m1}; P_2(1) = P_{m2}; \dots, \\ P_m(1) = P_{mm}, \dots, P_n(1) = P_{mn}. \end{aligned}$$

В нашем случае для вычисления этих значений необходимо из рассмотрения графа состояний (рис. 2) определить элементы матрицы (13) переходных вероятностей

$$\begin{aligned} P_{11} &= 1 - (P_{12} + P_{13}) = 0,9525; \\ P_{12} &= 0,0451; \\ P_{13} &= 0,0024; \\ P_{21} &= 0; P_{23} = 0,0024; \\ P_{22} &= 1 - 0,0024 = 0,9976; \\ P_{31} &= 0; \\ P_{32} &= 0; P_{33} = 1,0000. \end{aligned}$$

Матрица переходных вероятностей ВСУП:

$$P = \begin{vmatrix} 0,9525 & 0,0451 & 0,0024 \\ 0 & 0,0024 & 0,9976 \\ 0 & 0 & 1,0000 \end{vmatrix}.$$

В момент времени $t = t_0$ ВСУП находится в состоянии X_1 , поэтому $P_1(0) = 1,00$; $P_2(0) = P_3(0) = 0,0000$. Вероятности состояний ВСУП после налета t_1 берутся из первой строки матрицы P :

$$P_1(1) = 0,9525; P_2(1) = 0,0451; P_3(1) = 0,0024.$$

Вероятности состояний ВСУП после второго налета $t = t_2$ (шаг $k = 2$) вычислим по формуле [1]

$$P_j(2) = \sum_{i=1}^n P_i(1)P_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} P_1(2) &= P_1(1)P_{11} + P_2(1)P_{21} + P_3(1)P_{31} = 0,907; \\ P_2(2) &= P_1(1)P_{12} + P_2(1)P_{22} + P_3(1)P_{32} = 0,043; \\ P_3(2) &= P_1(1)P_{13} + P_2(1)P_{23} + P_3(1)P_{33} = 0,050. \end{aligned}$$

Вероятности состояний ВСУП после третьего времени налета в момент $t = t_3$ (третьего перехода) можно вычислить по рекуррентной формуле [1]:

$$P_j(m) = \sum_{i=1}^n P_i(m-1)P_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} P_1(3) &= P_1(2)P_{11} + P_2(2)P_{21} + P_3(2)P_{31} = 0,86; \\ P_2(3) &= P_1(2)P_{12} + P_2(2)P_{22} + P_3(2)P_{32} = 0,05; \\ P_3(3) &= P_1(2)P_{13} + P_2(2)P_{23} + P_3(2)P_{33} = 0,09. \end{aligned}$$

Выводы

1. Эксплуатационная надежность ВСУП с точки зрения наработки достаточно высокая $P_1(3) = 0,86$.

2. Полный отказ ВСУП после наработки t_3 более вероятен после выхода из строя еще одного блока ВСУП в ходе его эксплуатации с одним отказавшим блоком ВСУП (переход из состояния x_2 в состояние x_3) $Q_2(3) = 1 - P_2(3) = 0,95$.

3. Одновременный отказ двух блоков ВСУП сразу может произойти с вероятностью $Q_3(3) = 1 - P_3(3) = 0,91$.

Список литературы

1. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 576 с.

2. *Казак В.М.* Основы экспрес-диагностування: [навч. посібник] / В.М. Казак, А.К. Зюзько. – К.: НАУ, 2005. – 164 с.

3. *Доценко Б.И.* Системы автоматического контроля: [Учеб. пособие] / Б.И. Доценко, В.А.Игнатов, В.Н. Казак. – К.: КИИГА, 1995. – 148 с.