

УДК 629.735.017.84

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПОЛЕТОВ

И.Д. ДАШКОВ, Б.В. ЗУБКОВ

В статье рассматриваются вопросы, связанные с определением технических состояний функциональных систем (ФС) воздушных судов (ВС). Даны математические зависимости для выражения связей между основными параметрами, характеризующими эти состояния, которые позволили определить критерии уровня безопасности полетов, используемые в системе управления надежностью авиационной техники.

Ключевые слова: воздушное судно, функциональные системы, функциональный отказ, потребляющий элемент.

В процессе своего рассмотрения любая ФС может быть представлена в виде функционального энергетического или информационного блока (ФБ), который обслуживает один потребляющий элемент или их группу. Потребляющий элемент – это элемент, компонент ВС, гарантирующий функционирование ВС в полете. При отказе ФБ, т.е. при полной утрате работоспособности системы, потребляющий элемент, обслуживающий его, также полностью теряет свою работоспособность. В случае полной потери работоспособности потребляющего элемента или при выходе параметров, которые определяют состояние потребляющего элемента за предельно допустимые величины, считается, что потребляющий элемент отказал.

Отказ потребляющего элемента вызывает появление C_i ($i = 1, 4$) особой ситуации полета. Ранг потребляющего элемента Π_i принимается равным C_i особой ситуации полета. Ранг ФС S_i принимается равным наибольшему рангу среди множества рангов Π_i обслуживаемых функциональных систем.

Если ранг функциональной системы равен S_i , то предполагается, что система может попасть и в состояние S_j ($j < i$). Например, если ранг ФС S_4 , т.е. ее отказ может способствовать появлению особой ситуации C_4 , то она может находиться и в состояниях S_1 , S_2 и S_3 .

Пусть потребляющий элемент характеризуется множеством значений $\{x_i\}$, которые должны в период его активности находиться в заданных границах $\left\{ \Delta x_i; \frac{dx_i}{dt} \right\}$. Обеспечение этого условия является назначением обслуживающей системы, которая состоит из множества элементов. Потребляющий элемент, в зависимости от того, какие значения будут принимать параметры $\{x_i\}$, может находиться в $\{\Pi_i\}$ состояниях, которые соответствуют особым условиям C_i . Следует отметить, что значения $\{x_i\}$ будут зависеть от множества $\{y_i\}$ параметров на выходе обслуживающей системы. Когда параметры $\{y_i\}$ находятся в допустимых границах $\left\{ \Delta y_i; \frac{dy_i}{dt} \right\}$, то и $\{x_i\}$ не должны превышать допустимые пределы, т.е. потребляющий элемент работает исправно. Этому состоянию можно приписать значения Π_o . Соответственно значения $\{y_i\}$ будут определяться множеством состояний $\{z_i\}$ каждой из частей, которые входят в систему.

Если состояние потребляющего элемента отличается от Π_o , то это приводит к возникновению в полете некоторой ситуации C_i . Следовательно, любой ситуации C_i , в которую может

попасть ВС, будут соответствовать некоторые состояния $\{P_i\}$ потребляющего элемента. В свою очередь, $\{P_{ji}\}$ состояниям потребляющего элемента будет соответствовать некоторый комплекс параметров $\{y_{ji}\}$, которые определяются подмножеством значений $\{x_{ji}\}$ множества $\{x_i\}$.

Несомненно, что $\{x_{ji}\}$ зависит от некоторого комплекса параметров $\{z_{ji}\} \in \{Z_i\}$ элемента системы или от объединения соответствующих значений z_{ji} группы элементов.

Отсюда следует, что при анализе функциональных состояний систем воздушных судов нужно соблюдать определенную последовательность соответствий состояний

$$C_i \Rightarrow \{x_{ji}\} \Rightarrow \{S_{ji}\} \Rightarrow \{y_{ji}\} \Rightarrow \{z_{ji^k}\} \Rightarrow \bigcup_{k=1,n} \{z_{ji^k}^k\}, (1 \leq n \leq m), \quad (1)$$

где m – число составляющих, которые входят в систему; k – некоторый элемент системы; $\{z_{ji^k}^k\}$ – некоторое множество состояний k -го элемента.

Уравнениями надежностных состояний можно считать системы уравнений вероятности неоявления у системы S_i состояния. Данные уравнения – это результат построения структурных схем для каждой ситуации.

Проведем анализ некой системы, которая включает N элементов. Под элементами системы понимаются не только различные составляющие, но и трубопроводы, соединяющие их. Каждый k -й элемент системы $n_k (k = I, N)$ может в ходе эксплуатации принимать множество состояний $\{R_{jk}\} \in R_k$, где j – индекс, который описывает некоторое состояние. Затем любому R_{jk} состоянию n_k элемента может быть установлена в соответствие некоторая совокупность значений функциональных параметров (давление, температура, расход, утечка и др.) $\{Z_{jk}\} \in Z_k$. Из этого следует, что между множествами R_k и Z_k существует определенное соотношение, т.е. R_k отображается на множество $Z_k (\alpha / R_k \Rightarrow Z_k)$.

Исполнение операции $\alpha / R_k \Rightarrow Z_k$ обязательно для построения структурных схем функциональной надежности системы.

Для вывода уравнений надежностных состояний системы необходимо каждому состоянию R_{jk} элемента поставить в соответствие вероятность его отсутствия R_{jk} .

Множество значений функциональных параметров Z_k разбиваем на подмножество значений $\{Z_{jk}\} \in Z_k^*$, соответствующих нормальной работе системы, и подмножества значений $\{Z_{jk}^i\} \in Z_k^i$, порождающих появление у системы i -х состояний, переводящих воздушное судно в C_i особую ситуацию ($i = 1, 4$). Бесспорно, что:

$$Z_k^* \bigcup_{i=1,4} Z_k^i = Z_k \text{ и } \alpha_0 / Z_k^0 \Rightarrow S_0; \quad (2)$$

$$\alpha_i / Z_k^i \Rightarrow C_i. \quad (3)$$

В соответствии с этим множество состояний k -го элемента можно также разбить на подмножества R_k^0 и R_k^i , для которых будут справедливы $\alpha_0 / R_k^0 \Rightarrow Z_k^0$; $\alpha_i / R_k^i \Rightarrow Z_k^i$. Отсюда следует, что будет происходить и $\beta_i / R_k^i \Rightarrow C_i$. Получается, необходимо все множество R_k разбить на пять таких групп, для которых выполняются $\alpha_0 \beta / R_k^0 \Rightarrow Z_k^0 \Rightarrow C_0$ и $\alpha_i \beta_i / R_k^i \Rightarrow Z_k^i \Rightarrow C_i$.

Получается
$$R_k = \bigcup_{j=0,4} R_{jk}. \quad (4)$$

Каждому состоянию R_{jk} поставим в соответствие вероятность его появления F_{jk} .

Примем (в большинстве случаев это является правомочным), что вероятности F_{jk} в совокупности несовместимы. Тогда вероятность безотказной работы k -го элемента будет равна

$$P_k = 1 - \sum_{j=0}^4 F_{jk} . \quad (5)$$

Множество состояний элементов R_k образуют множество состояний системы $S = US_i$. Так как число состояний j любого k -го элемента в соответствии с принятым объединением состояний на группы не превышает пяти, то множество S в общем случае будет содержать не более S^N различных, несовместных состояний элементов.

Задача построения уравнений надежностных состояний системы состоит в разбиении множества S на подмножества S такие, для которых выполнялись бы отображения $S_i \Rightarrow C_i$.

Переход системы в S_i состояние может вызываться не только в результате появления у k -го элемента R_{jk} состояния. Система может перейти в S_i состояние и в результате комбинации R_{jk} состояний нескольких элементов, т.е. появления совместных состояний. Это возможно, если в полете допускается возникновение отказов или неисправностей сразу нескольких составляющих одновременно.

Если может возникнуть ситуация, что одновременно проявится отказ или неисправность двух изделий, то нужно рассмотреть отношения пар объектов, так называемые бинарные отношения. Если же это будет отказ или неисправность трех изделий, то соответственно необходимо рассматривать отношения троек объектов и т.д.

В случае бинарных отношений рассматривается множество пар $\langle R_{\mu km}, R_{\gamma kn} \rangle$, где $\mu \in j, \gamma \in j, k \in k = \overline{1, n}, k_n \in k = \overline{1, n}$, т.е. следует рассмотреть декартово произведение множеств

$$R_{km} \times R_{kn} = R_{\langle km; kn \rangle} . \quad (6)$$

Далее разобьем множество $R_{\langle km; kn \rangle}$ совместных состояний на подмножества $R_{\langle km; kn \rangle}^i$, для которых имеет место

$$\beta : R_{\langle km; kn \rangle} \Rightarrow S_i . \quad (7)$$

Пусть $\{R_{j \langle km; kn \rangle}\} \in R_{\langle km; kn \rangle}^i, j = i$, тогда $R_{j \langle km; kn \rangle} = \langle R_{\mu km}, R_{\gamma kn} \rangle$, причем $\mu < i = j$ и $\gamma < i = j$.

Получается, множества $R_{\langle km; kn \rangle}$ будут включать в себя упорядоченные пары состояний двух объектов, причем каждое из этих состояний в отдельности не вызовет возникновения у системы S_i -го состояния. Оно может вызвать только появление состояний низшего ранга по сравнению с S_i , не вызывая нарушений работоспособности самой системы.

Аналогичным образом это касается множества трепарных отношений (когда участвуют три изделия) и других. В частности, отношения состояний элементов обязательно рассматриваются при тщательно проанализированной работе параллельно-соединенных групп элементов.

Делаем вывод, что для каждой части системы установлены ее состояния и выполнена их группировка по степени опасности ситуации, которые в свою очередь могут возникать у системы.

Далее считаем, что известны упорядоченные отношения $R_{j \langle k1, k2, \dots, km, \dots, kn, \dots, kN \rangle}$, также способствующие появлению $C_{i(i=j)}$ особой ситуации. Тогда можно установить уравнения надежностных состояний системы, которые будут соответствовать появлению в полете особых ситуаций.

Если в полете допускается отказ или неисправность только одного элемента, то уравнение надежностного состояния системы приобретет следующий вид

$$F(S_i) = 1 - \prod_{k=1}^n P_{jk}, \quad (8)$$

где $P_{jk} = 1 - F_{jk}$; $j = i$; $i = 1, 4$; $n \leq N$.

Последнее условие означает, что среди N элементов системы не у всех будут такие состояния, при которых будет возможно появление особой ситуации. Естественно в случае указанного допущения вероятность непоявления совместных состояний принимается равной единице.

Несложно заметить, что если допускаются n -арные отношения состояний между различными элементами системы (упорядоченные комбинации состояний n элементов системы), то этим отношениям в структурной схеме соответствует параллельное соединение n звеньев. Причем k -е звено характеризуется вероятностью γ -го состояния n_k элемента системы.

Конкретно для бинарных отношений состоянию $R_{j<km;kn>}$, отвечающему упорядоченной паре состояний $<R_{\mu km}, R_{\gamma kn}>$, будет соответствовать вероятность его непоявления

$$P_{j<km, kn>} = 1 - (1 - P_{\mu km}) \cdot (1 - P_{\gamma kn}), \quad (9)$$

где $P_{\mu km}$ - вероятность непоявления у k -го элемента μ -го состояния; $P_{\gamma kn}$ - вероятность непоявления у k_n -го элемента γ -го состояния; $\mu = 0$; $j = 1$; $\gamma = 0$; $j = 1$.

Для резервированных групп системы, состоящих из одинаковых элементов, в случае нагруженного резерва n -арные отношения описывают возможность возникновения отказов у n элементов из их общего числа в резервированной группе, равного l .

Если при отказе n элементов из числа l система переходит к состоянию S_i , то вероятность непоявления этого состояния равна

$$P_r(S'_i) = 1 - \sum_{z=0}^n \left(\frac{l-n+z}{l} \right) P_r^{n-z} (1 - P_r)^{l-n+z}, \quad (10)$$

где P_r - вероятность безотказной работы элементов r -й резервированной группы; $\left(\frac{l-n+z}{l} \right) = C_l^{l-n+z}$ - число сочетаний из числа l элементов $l-n+z$.

В целом уравнение надежностного состояния системы будет определяться функцией вида

$$F_{S'_i} = F(S'_i) = 1 - \prod_{k=1}^n P_{jk} \prod_{r=1}^R P_r(S'_i) \prod_{\omega=r}^{\Omega} P_{j<\omega>}, \quad (11)$$

где R - число резервированных групп элементов; ω - символ упорядоченного отношения состояний элементов системы; Ω - заданный порядок отношений элементов; $P_{j<\omega>}$ - вероятность непоявления множества совместных событий.

Для $\omega = 2$ $P_{j<\omega>}$ будет определяться соотношением

$$P_{j<\omega>} = \prod_{1}^d P_{j<km, kn>}, \quad (12)$$

где d - число упорядоченных пар $<k_m, k_n>$.

IDENTIFICATION AND ASSESSMENT OF THE AIRCRAFT FUNCTIONAL SYSTEMS IN THE FLIGHT SAFETY MANAGEMENT SYSTEMS

Dashkov I.D., Zubkov B.V.

The article discusses issues related to determining the technical states of aircraft functional systems (FS). Mathematical formulas are given for expressing the relationship between the main parameters characterizing the model.

Key words: aircraft, functional systems, functional failure, consuming element.

Сведения об авторах

Дашков Иван Дмитриевич, 1990 г.р., окончил МГТУ ГА (2013), аспирант МГТУ ГА, область научных интересов – эксплуатация летательных аппаратов.

Зубков Борис Васильевич, 1940 г.р., окончил КИИГА (1966), действительный член Академии наук авиации и воздухоплавания, доктор технических наук, профессор МГТУ ГА, автор более 150 научных работ, область научных интересов – вопросы обеспечения безопасности полетов и жизнедеятельности авиационной безопасности.