УДК 681.321

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ОДНОГО КЛАССА

д.т.н., проф. В. С. Харченко, З. Г. Мухаметов, В. Г. Грек

Предлагается обобщенная модель для оценки живучести летательных комплексов, которые представлены структурными схемами надежности их систем, функционирующих в условиях экстремальных воздействий.

Введение. К летательным комплексам (ЛК) (авиационным, ракетным, ракетно - космическим) предъявляются высокие требования по надежности и живучести. При этом вопросы оценки живучести ЛК исследованы недостаточно, и решаются они либо в рамках понятий теории надежности, либо сводятся только к оценке организационно - технических мер, направленных на сохранение работоспособности в условиях экстремальных воздействий (ЭВ) [1].

Целью данной статьи является разработка модели ЛК, которая учитывает его надежностные характеристики, характеристики экстремальных воздействий, а также параметров процессов деградации систем ЛК.

Модель ЛК задается:

а) структурной схемой надежности $\mathbf{C}_{\text{лк}}$:

$$\mathbf{C}_{\text{лк}} = \left\{\mathbf{ГЯ}_{\mathbf{j}}\right\}_{\mathbf{j=1}}^{\mathbf{n}}, \tag{1}$$

где $\mathbf{ГЯ}_{\mathbf{j}}$ - группа подсистем (ярусов) с однотипной структурной схемой надежности; $\mathbf{n}$ - число групп.

Каждая из групп задается множеством ярусов

$$\mathbf{ГЯ}_{\mathbf{j}} = \left\{\mathbf{Я}_{\mathbf{j\nu}}\right\}_{\nu=1}^{\mathbf{k_j}}, \tag{2}$$

где $\mathbf{k_j}$ - число ярусов $\mathbf{j}$ - го типа.

Тип яруса определяется соответствием

$$\mathbf{ГЯ}_{\mathbf{j}} \sim \left\{\mathbf{k_j}, \mathbf{m_j}, \mathbf{АВО_j}\right\}, \tag{3}$$

причем $\mathbf{k_j}$ - число ярусов $\mathbf{j}$ - го типа,

$\mathbf{m_j}$ - кратность резервирования,

$\mathbf{ABO_j}$ - алгоритм функционирования восстанавливающего органа.

При $\mathbf{m_j \geq 1}$ $\mathbf{Я_{j\nu}}$ задается множеством элементов $\mathbf{Э_{j\nu\rho}}$

$$\mathbf{Я_{j\nu} = \left\{ Э_{j\nu\rho} \right\}_{\rho=1}^{m_j}}. \tag{4}$$

Если структурная схема надежности $\mathbf{C_{лк}}$ включает участки, которые не могут быть представлены в стандартной последовательно - параллельной форме (ППФ), они либо выделяются в отдельные подсистемы и рассматриваются по отдельной методике, либо раскладываются в эквивалентную ППФ;

б) пространственной моделью ЛК. Эта модель $\mathbf{V_{лк}}$ задает:

- пространственные координаты каждого элемента (подсистемы) ЛК $\mathbf{Э_{j\nu\rho} \in Я_{j\nu} \in ГЯ_j \in C_{лк}}$

$$\mathbf{Э_{j\nu\rho} \sim \left\{ X_{j\nu\rho}, Y_{j\nu\rho}, Z_{j\nu\rho} \right\}}; \tag{5}$$

- булеву матрицу функциональных взаимосвязей элементов:

$$\mathbf{M_э = \left\| \alpha_{j\nu\rho} \right\|}, \tag{6}$$

причем
$$\mathbf{\alpha_{j\nu\rho} = \left\langle \delta_{j\nu\rho}^{1}, \ldots, \delta_{j\nu\rho}^{\varphi} \right\rangle}, \tag{7}$$

где $\mathbf{\delta_{j\nu\rho}^{\theta} = 0(1)}$, если связь между элементом $\mathbf{Э_{j\nu\rho}}$ и $\mathbf{Э^{\theta} \in C_{лк}}$ отсутствует (существует);

$$\mathbf{\theta = \sum_{j=1}^{n} k_j m_j}; \tag{8}$$

в) надежностными характеристиками элементов комплекса - множеством $\mathbf{MP_{лк}}$ и его составляющими:

- вероятностью безотказной работы элементов

$\mathbf{Э_{j\nu\rho}(Э^{\theta}) \in C_{лк} - P_{j\nu\rho}(t)}$, причем обычно $\mathbf{P_{j\nu\rho}(t) = P_{j\nu}(t)}$;

- вероятностью безотказной работы восстанавливающих органов $\mathbf{BO_{j\nu} - P_{BO_{j\nu}}(t)}$;

г) множеством функций потери качества ярусов $\mathbf{Я_{j\nu}}$:

$$\mathbf{MK_{лк}} = \left\{ \Delta \mathbf{K}_{j\nu}, \nu = \overline{1, k_{j\nu}} \right\}_{j=1}^{n}, \tag{9}$$

где $\Delta\mathbf{K}_{j\nu}$ - объем потери качества функционирования комплекса, причем

$$\Delta\mathbf{K}_{j\nu} = \left\{ \Delta\mathbf{K}_{j\nu}^{м} \right\}_{M=1}^{L}, \tag{10}$$

где $\mathbf{L}$ - число показателей качества ЛК.

Тогда каждому уровню качества систем ЛК, определяемому выражением $\mathbf{K}_{j\nu} = \mathbf{K}_{лк} - \Delta\mathbf{K}_{j\nu}$, ставится в соответствие состояние $\mathbf{S}_{j\nu}$ из множества $\mathbf{MS}_{лк}$.

В общем случае, величина $\Delta\mathbf{K}_{j\nu}^{м}$ является функцией состояния других ярусов, характеризуемых булевым вектором

$$\beta_{j\nu}^{м} = \left\langle \chi_{j\nu 1}^{м}, \ldots, \chi_{j\nu\lambda}^{м} \right\rangle, \tag{11}$$

где $\chi_{j\nu} = 0(1)$, если ярус $\mathbf{Я}_{j\nu}$ неработоспособен (работоспособен);

$$\lambda = \sum_{j=1}^{n} k_j. \tag{12}$$

Следовательно, $$\Delta\mathbf{K}_{j\nu}^{м} = f(\beta_{j\nu}^{м}). \tag{13}$$

Таким образом, модель ЛК задается четверкой

$$\mathbf{ЛК} = \left\{ \mathbf{C}_{лк}, \mathbf{V}_{лк}, \mathbf{MP}_{лк}, \mathbf{MK}_{лк} \right\}. \tag{14}$$

Модель ЭВ имеет трехуровневую схему.

На первом уровне она задается моделью (показателями) мощности источника воздействий (ИВ).

На втором (физическом) уровне описывается физические показатели воздействий (ФВ), а именно их ударные, электромагнитные, радиационные и др. характеристики.

На третьем результирующем уровне определяются показатели, оцениваемые вероятностями поражения элементов структуры (структурные воздействия (СВ)).

Итак, модель ЭВ $\mathbf{M}_{эв}$ описывается двумя передаточными функциями $\mathbf{W}_{эв1}$, $\mathbf{W}_{эв2}$, связывающими соответственно ИВ и ФВ, ФВ и СВ:

$$\mathbf{ФВ} = \mathbf{W}_{эв1}\left(\mathbf{ИВ}, \mathbf{V}_{эв}, \mathbf{СЗ}_{лк}\right), \tag{15}$$

$$\mathbf{СВ} = \mathbf{W}_{\text{эв2}}(\mathbf{ФВ}). \tag{16}$$

При этом, функция $\mathbf{W}_{\text{эв1}}$ зависит не только от аргумента **ИВ**, а и от пространственных характеристик ЭВ $\mathbf{V}_{\text{эв}}$ относительно элементов ЛК (модели $\mathbf{V}_{\text{лк}}$) и степени их защищенности $\mathbf{СЗ}_{\text{лк}}$. Таким образом, аргументом функции $\mathbf{W}_{\text{эв2}}$ являются финальные характеристики ФВ, действующие непосредственно на элементы $\mathbf{Э}_{j\nu\rho} \in \mathbf{ЛК}$.

Тогда модель воздействий задается сложной функцией $\mathbf{W}_{\text{эв}}$, являющейся композицией функций (15) и (16):

$$\mathbf{СВ} = \mathbf{W}_{\text{эв}}(\mathbf{ИВ}). \tag{17}$$

Характеристики структурных воздействий могут задаваться двояко:

а) вероятностями поражения элементов ЛК $\mathbf{q}_{j\nu\rho}^{\text{эв}}$. При этом речь идет о вероятности поражения элементов после первого ЭВ. В общем случае при $\mathbf{i}$ - том ЭВ вероятность $\mathbf{q}_{j\nu\rho}^{\text{эв}(i)}$ может зависеть от вероятностей поражения вследствие предыдущих $\mathbf{i - 1}$ воздействия:

$$\mathbf{q}_{j\nu\rho}^{\text{эв}(i)} = \mathbf{f}(\mathbf{q}_{j\nu\rho}^{\text{эв}(\varepsilon)}, \varepsilon = \overline{1, i-1}). \tag{18}$$

Тогда вероятность сохранения работоспособности элементов ЛК в момент времени $\mathbf{t}$ после $\mathbf{i}$ - го ЭВ оценивается выражением

$$\mathbf{т}_{\text{ср}\,j\nu\rho}^{(i)}(\mathbf{t}) = \mathbf{т}_{j\nu}(\mathbf{t})[1 - \mathbf{q}_{j\nu\rho}^{\text{эв}(i)}] \ . \tag{19}$$

При независимости событий, связанных с поражением элементов ЛК отдельными воздействиями, выражение (19) приобретает вид

$$\mathbf{т}_{\text{ср}\,j\nu\rho}^{(i)}(\mathbf{t}) = \mathbf{т}_{j\nu}(\mathbf{t})[1 - \mathbf{q}_{j\nu\rho}^{\text{эв}}]^{i}; \tag{20}$$

б) вероятностями поражения $\mathbf{r}$ элементов ЛК. В этом случае принимается допущение о равнопоражаемости элементов и построение модели живучести ЛК осуществляется комбинаторно - вероятностными методами [2, 3]. Если задается закон (функция) распределения случайной величины $\mathbf{r}$, то могут использоваться имитационные модели [4].

Принципы оценки живучести ЛК. Оценку живучести систем ЛК в целом можно осуществлять:

- с использованием аналитических комбинаторно - вероятностных моделей [2]. Такие модели целесообразно применять для оценки живучести систем ЛК с регулярной и глубоко резервированной структурой (например, для бортовой ЦВМ). Тогда осуществляется перебор комбинаций отказов элементов, обусловленных и естественными причинами, и ЭВ;

- с использованием марковских моделей [4]. Эти модели применяются в том случае, когда выполняются условия «марковости» процессов естественных отказов и событий, связанных с экстремальными воздействиями. Кроме того, еще одним условием целесообразности использования марковских моделей является возможность представления ЛК сравнительно небольшим числом состояний (до 20 - 30), либо при регулярном характере графов переходов;

- с использованием имитационных моделей. Эти модели позволяют получать наиболее точные оценки живучести, то есть имитируются процессы естественных отказов элементов систем, ЭВ (по времени, продолжительности, кратности отказов и др.). Имитационная модель позволяет оценить стойкость систем ЛК в условиях ЭВ. Модель целесообразно развить в направлении оценки параметров с учетом зависимости потерь качества ЛК от отказов различных элементов и подсистем (9) - (13).

Выводы. Предложенная модель систематизирует множество элементов, влияющих на оценку живучести ЛК. Состав и количественные характеристики этих элементов определяются типом ЛК. Оценку живучести ЛК целесообразно осуществлять, используя комплекс комбинаторно -вероятностных (аналитических), марковских и имитационных моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. - М.: Высшая школа, 1987. - 400 с.

2. Харченко В.С., Лысенко И.В., Мельников В.В. Оценка и обеспечение живучести информационно - вычислительных и управляющих систем ТККИ // Зарубежная радиоэлектроника. - 1996. - №1. - С. 64 - 80.

3. Харченко В.С., Марков П.Е. Живучесть и безопасность систем летательных комплексов. - Х.: МОУ, 1994. - 68 с.

4 Советов Б. Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. - М.: Высшая школа, 1985. - 272 с.