

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 629.7.075

О ВОЗМОЖНОЙ МОДЕЛИ УТРАТЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ АЭРОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. В. Бецков

В ходе выполнения целевых задач по обеспечению безопасности обслуживаемых объектов работоспособность системы аэромобильных комплексов специального назначения (далее – АМК) не является всегда однозначной. Как известно, строгого понятия «ресурс системы» не имеется, анализируется интуитивное понятие ресурса и его меры ξ , на которой строится теория расходования ресурса [1–3]. Поэтому вместо понятия ресурса будем характеризовать функционирование системы АМК ее работоспособностью. В качестве таких характеристик могут быть: вектор состояния параметров системы АМК, изменение вектора фазовых координат АМК, вектор возмущений параметров внешней среды, моменты отказов элементов (блоков, агрегатов) системы АМК и др. Причем моменты отказов будут являться основной причиной потери работоспособности АМК, на которую влияют множество причин и факторов. Поэтому мы будем исследовать потерю работоспособности системы АМК по причине ее отказов.

Обозначим моменты отказов системы АМК (или ее конкретного элемента) как $\xi_i, i = \overline{0, n-1}$. Если на систему АМК (элемента, изделия) производится какое-то воздействие в режиме ξ_i в течение времени $\tau, \tau < \xi_i$, то продолжительность ее функционирования уменьшится и станет равной $\xi_i - \tau, \tau = \overline{0, n-1}$. Будем «изменять» моменты отказов в долях T_0 (средняя наработка на отказ).

При этом справедливо условие

$$M\xi_0 = 1. \quad (1)$$

Величину τ можно рассматривать как характеристику утраты системой АМК работоспособности. Зафиксируем произвольное значение $0 \leq \tau \leq t$ и определим характеристику утраты эффективности функционирования системы АМК на временном интервале $[\tau, t]$. Обозначим ее как $q(\tau; t, \xi_i)$. Очевидно, что

$$q(\tau; t, \xi_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } \tau > \xi_i \\ \tau, & \text{если } \xi_i > \tau, \xi_i < t \\ t - \tau, & \text{если } \xi_i > t \end{cases}$$

Усредним функцию $q(\tau; t, \xi_i)$, зависящую от случайной величины ξ_i . Тогда получим $M_q(\tau; t, \xi_i) = Q(\tau; t, \xi_i)$ – обобщенную характеристику утраты эффективности работоспособности

системы АМК на временном отрезке $[\tau, t]$ при воздействии на систему (изделие) в режиме ξ_i . Для определения показателя $Q(\tau; t; \xi_i)$ необходимо знать функцию распределения

$$F_i(t) = P(\xi_i < t), i = \overline{0, n-1}.$$

На практике, как правило, такая информация не известна [2]. Поэтому будем вместо $Q(\tau; t; \xi_i)$ выбирать другие характеристики $L(\tau; t; \xi_i)$, которые должны быть тесно связаны с $Q(\tau; t; \xi_i)$, являясь некоторым оператором, т.е. $L(\xi_i) = AQ(\xi_i)$, $i = \overline{0, n-1}$. Однако не все операторы подходят для решения задачи. Функции $L(\tau; t; \xi_i)$ должны также характеризовать безопасность функционирования системы АМК и удовлетворять следующим условиям. Чем больше значение $L(\tau; t; \xi_i)$, тем больше утрата безопасности системы (изделия) и, наоборот [3]. Поэтому будем предполагать, что функция $L(\tau; t; \xi_i)$ (где ξ_i – некоторый допустимый режим воздействия на систему (изделие)) удовлетворяет следующим условиям [4].

Обозначим $\bar{E}$ – множество допустимых режимов воздействия на систему АМК, которое состоит из E и всех переменных режимов, составленных из исходных режимов $i \in E$. Рассмотрим. Пусть качество функционирования некоторой системы АМК характеризуется двумя параметрами x_1 и x_2 . Наша задача – установить функциональную зависимость $\psi(x_1, x_2)$ между ними. Предположим, что имеется n систем и у каждой из них удалось получить количественные оценки параметров x_1 и x_2 , т.е. получить информацию $(x'_1 \text{ и } x'_2)$, где x'_1 и x'_2 – значение параметров соответственно x_1, x_2 i -й системы (изделия), $i = \overline{1, n}$. Если в пределах погрешности измерений точки (x'_1, x'_2) лежат на кривой, описываемой уравнением $\psi(x_1, x_2) = 0$, то между параметрами x_1 и x_2 существует функциональная зависимость $\psi(x_1, x_2) = 0$ (рис. 1, а, б), в противном случае – ее нет.

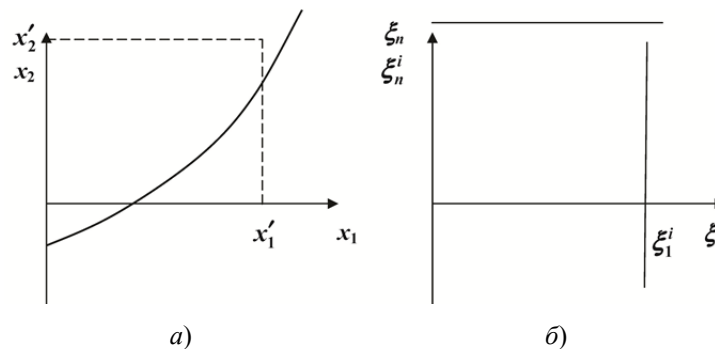


Рис. 1. Наблюдаемые и одновременно не наблюдаемые параметры

Представленный подход – это методология установления, является основной (доминирующей) в физике, химии, биологии и других областях науки. При интенсивных воздействиях на систему (изделие) такая методология не пригодна [5]. У исследуемой системы нельзя измерить моменты отказов $\xi_0(\omega_0)$ и $\xi_i(\omega_0)$. При воздействии на i -ю систему (изделие) с конструкторскими параметрами ω_0 в режиме ξ_1 можно определить момент отказа $\xi_1^i(\omega_0)$. Однако при этом система изменит свои первоначальные свойства (параметры ω_0) и для нее нельзя уже будет восстановить отказ $\xi_0(\omega_0)$. Таким образом, после воздействия на систему (изделие) можно получить значение одной координаты случайного вектора $(\xi_0(\omega_0), \xi_i(\omega_0))$ (рис. 1, б). Аналогичная ситуация возникает, когда i -я система (изделие) функционирует в режиме воздействия ξ_1 . В результате мы определим момент отказа $\xi_1(\omega_0)$, а вторая компонента случайного вектора $(\xi_1(\omega_0), \xi_0(\omega_0))$ будет неизвестна. Параметры $\xi_1(\omega_0)$ и $\xi_0(\omega_0)$ называют одновременно наблюдаемыми.

1. Анализ аддитивности системы уравнений

Рассмотрим условие аддитивности.

При любом $\theta \in (\tau, t)$ справедливо равенство

$$L(\tau, t; \xi) = L(\tau, t; \xi) + L(\theta, t; \xi).$$

Отсюда вытекает более общее соотношение

$$L(\theta_1, \theta_n; \xi) = \sum_{i=2}^n L(\theta_{i-1}, \theta_i; \xi); \quad \xi \in \bar{E} \quad (2)$$

при любых $\theta_1 \leq \theta_2 \leq \dots \leq \theta_n$.

2. Условие соблюдения марковского процесса

Условие марковости в нашем определении следующее.

Функция $L(\tau, t; \xi)$ зависит от величины выработанного ресурса в прошлом $L(0, \tau; \xi)$ за время τ и не зависит от того, каким образом выработан этот ресурс – в каком режиме (возможно целенаправленное агрессивное воздействие на систему) [6, 7]. В формализованном представлении это условие можно записать в следующем виде.

Если $L(0, \theta; \xi_2) = L(0, \tau; \xi_1)$, то $L(\theta, \theta + t; \xi) = L(\tau, \tau + t; \xi)$, $\xi \in \bar{E}$. Для удобства последующих исследований целесообразно сделать следующие преобразования.

1. Понизить размерность функции $L(0, t; \xi)$, введя скорость утраты работоспособности системы в результате агрессивного на нее воздействия:

$$\mu(t, \xi) = \frac{L(0, t; \xi)}{dt}.$$

Тогда функцию $L(\tau, t; \xi)$ можно представить в виде

$$L(\tau, t; \xi) = \int_{\tau}^t \mu(t, \xi) dt.$$

2. Вместо моментов отказов ξ будем использовать правило $v(\xi)$, согласно которому считаем, что система неработоспособна. Правило $v(\xi)$ имеет размерность t и является случайной величиной.

Обозначим $H(t, \xi) = P(v(\xi) < t)$ – его функция распределения. Рассмотрим уравнение, описывающее процесс утраты работоспособности системы (изделия). Предположим, что

$$ML(0, v; \xi) = 1 \quad \forall \xi_i \in E. \quad (3)$$

Если

$$ML(0, v; \xi_i) = c_i > 0, \quad c_i \neq 1, \quad i = \overline{0, n-1},$$

то вместо $L(0, v; \xi_i)$ введем другую характеристику потери работоспособности системы $L(0, v; \xi_i) / c_i$, которая будет удовлетворять условию (3). Дополнительное ограничение состоит в том, что нормировка (3) справедлива не только для $\xi_i \in E$, но и для всех возможных режимов воздействия на систему, т.е.

$$ML(0, v; \xi_i) = \int_0^{+\infty} L(0, v; \xi_i) dH(v, \xi) = 1 \quad \forall \xi \in \bar{E}. \quad (4)$$

Будем считать, что потеря работоспособности системы АМК предполагает динамическую или потенциальную (статическую) опасность. Воспользуемся методом, предложенным в [1]:

$$L(0, v; \hat{\xi}) = L(0, v; \xi_0) \quad \text{при } 0 \leq v \leq t_1. \quad (5)$$

Если $t_1 \leq v \leq t_2$, то это означает, что на систему (изделие) действует более жесткий режим ξ_1 . Продолжительность τ этого режима определяется из равенства

$$L(0, \tau_1; \xi_1) = L(0, t; \xi_0). \quad (6)$$

Используя свойства аддитивности и марковости, определим утрату работоспособности системы в промежутке $[0, \eta]$. Предварительно заметим, что η – это правило прекращения функционирования системы, зависящей от моментов отказов элементов (агрегатов) системы и их функций распределения, что однозначно определяется скоростью утраты работоспособности $\eta(t, \xi)$ (условие (2)). Таким образом, суммарная потеря работоспособности системы (изделия) на интервале $[0, \eta]$ будет определяться как

$$L(0, v; \xi) = L(0, \tau_1; \xi_1) + L(\tau, v; \xi_1) = L(0, v - t_1 + \tau_1; \xi_0) \text{ при } t_1 \leq v \leq t_2. \quad (7)$$

На рис. 2 иллюстративно представлены режимы воздействия на систему АМК при ее функционировании.

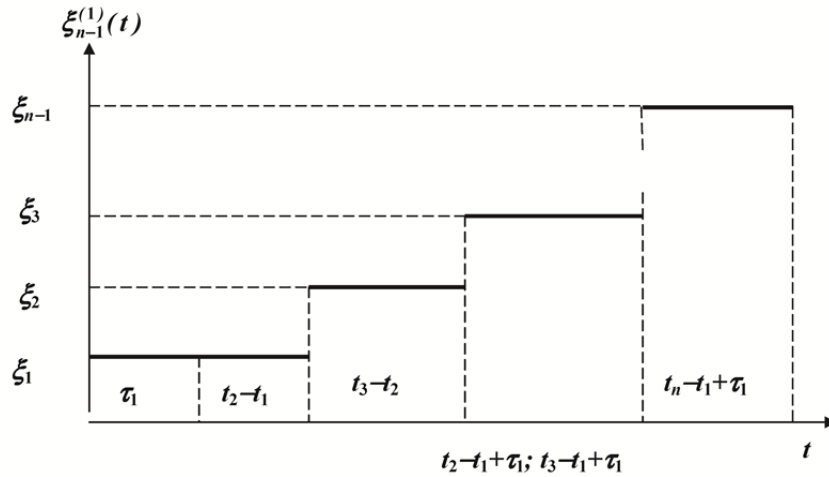


Рис. 2. Преобразованный режим воздействия на систему АМК с $n - 1$ ступенями

Аналогично поступим при $v \in [t_2, t_3]$. Первую ступень режима воздействия на систему (изделие) $\xi_{n-1}^{(1)}(t)$ заменим на эквивалентную по утрате работоспособности в режиме ξ_2 . Продолжительность воздействия τ_2 находится из равенства

$$L(0, t_2 - t_1 + \tau_1; \xi_1) = L(0, \tau_2; \xi_2). \quad (8)$$

Снова используя условия (1) и (2), запишем суммарную утрату работоспособности на временном промежутке $[0, v]$ в виде

$$L(0, v; \hat{\xi}) = L(0, \tau_2; \xi_2) + L(\tau_2 - t_1 + \tau_1, v - t_1 + \tau_2; \xi_2) = L(0, v - t_2 + \tau_2; \xi_2), \quad t_2 \leq v < t_3. \quad (9)$$

После замены первой ступени в $\hat{\xi}_{n-2}^{(1)}$ на эквивалентную согласно (9) получим переменный режим воздействия на систему (изделие) как $\hat{\xi}_{n-2}^{(2)}(t)$ с $n - 2$ ступенями (рис. 3).

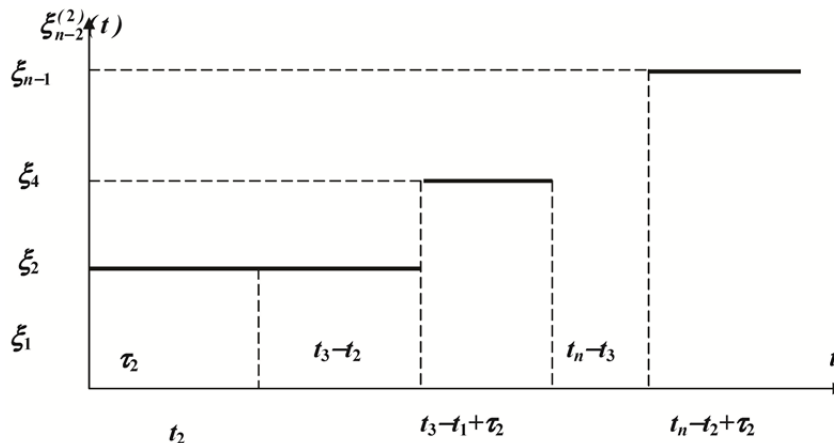


Рис. 3. Иллюстрация переменного режима воздействия $\hat{\xi}_{n-2}^{(2)}$

Исходя из (1–3), методом математической индукции можно получить выражение для $L(0, v; \hat{\xi})$ при любых $v \in (t_j, t_{j+1}), j = \overline{0, n-1}, t_n = +\infty$:

$$L(0, v; \hat{\xi}) = \sum_{k=1}^j L(\tau_k, t_{k+1} - t_k + \tau_k; \xi_k) + L(\tau_j, v - t_j + \tau_j; \xi_j). \quad (10)$$

Значения t_j определяются из рекуррентных выражений

$$L(0, \tau_i; \xi_{i+1}) = L(0, t_i - t_{i-1} - \tau_{i-1}; \xi_{i-1}), \quad (11)$$

$$i = 0, 1, \dots, \tau_0 = t_0 = 0.$$

Введем функцию

$$\psi(t, \tilde{\xi}) = \begin{cases} 0, 0 \leq t < t_1 \\ \tau_1, t_1 \leq t < t_2, \\ \dots \end{cases}$$

$$\psi(t, \tilde{\xi}) = \begin{cases} 0, 0 \leq t < t_1 \\ t_1, t_1 \leq t < t_2 \\ \dots \end{cases}$$

и

$$P(t, \tilde{\xi}) = G(t, \tilde{\xi}) - \psi(t, \tilde{\xi}) + t.$$

Тогда (10) и (11) можно представить в виде

$$L(0, v; \hat{\xi}) = \int_0^v \mu(P(t, \hat{\xi}), \xi_t) dt = L(0, P(v, \tilde{\xi}); \tilde{\xi}_t). \quad (12)$$

Здесь $\tilde{\xi}_t$ означает режим $\xi \in E$, в котором система функционировала в момент времени t .

После замены в (4) характеристики $L(0, v; \xi)$ на правые части (12) получим два уравнения, описывающие процесс утраты работоспособности системы при воздействии на нее любого переменного режима

$$\int_0^\infty dH(v, \hat{\xi}) \int_0^v \mu(P(t, \tilde{\xi}_t), \xi_t) dt = 1,$$

$$\int_0^v L(0, P(v, \tilde{\xi}), \tilde{\xi}) dH(v, \hat{\xi}) = 1.$$

Исходя из полученных результатов уравнений, можно судить о состоянии работоспособности и о процессе утраты его во времени и под воздействием некоторых внешних факторов.

Список литературы

1. Северцев, Н. А. Введение в безопасность / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – М. : Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Российской академии наук, 2008. – 176 с.
2. Юрков, Н. К. Безопасность сложных технических систем / Н. К. Юрков // Вестник Пензенского государственного университета. – 2013. – № 1. – С. 129–134.
3. Юрков, Н. К. Оценка безопасности сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 15–21.
4. Северцев, Н. А. Системный анализ теории безопасности / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2009. – 452 с.

5. Северцев, Н. А. Метод оценки показателей безопасности автономных динамических систем / Н. А. Северцев, А. Н. Катулев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 17–26.
6. Обеспечение готовности аэромобильного комплекса в условиях внешней угрозы / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, Ю. В. Лончаков, И. В. Прокопьев // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2013. – Т. 1. – С. 68–69.
7. Северцев, Н. А. К вопросу об утрате работоспособности систем / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. М. Самокутяев // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2013. – Т. 2. – С. 267–269.

Бецков Александр Викторович

доктор технических наук, доцент,
кафедра управления органами внутренних дел
в особых условиях,
Академия управления МВД России,
(125171, Россия, г. Москва,
ул. Зои и Александра Космодемьянских, д. 8)
(499) 745-95-20
E-mail: abckov@mail.ru

Аннотация. В статье предложены подход и модели утраты работоспособности системы аэромобильных комплексов (АМК) специального назначения, влияющие на безопасность функционирования на основе аддитивно-марковских моделей расходования ресурса. При этом вместо понятия ресурса системы АМК используется ее работоспособность, а именно: вектор состояния параметров системы АМК, изменение вектора фазовых координат АМК, вектор возмущений параметров внешней среды, моменты отказов элементов (блоков, агрегатов) системы АМК и др. Считаем, что моменты отказов являются основной причиной потери работоспособности АМК. Проводится анализ потерь работоспособности системы АМК по причине ее отказов.

Ключевые слова: аддитивность, система аэромобильных комплексов специального назначения, работоспособность, вектор состояния параметров, вектор фазовых координат, вектор возмущений параметров внешней среды, отказ системы, интенсивность возмущений, метод математической индукции.

Betskov Aleksandr Viktorovich

doctor of technical sciences, associate professor,
sub-department of management bodies of internal
affairs in the special conditions,
Russian Academy of the interior Ministry
(125171, 8 Zoy and Alexander Kosmodemianskys
street, Moscow, Russia)

Abstract. The article suggested approach and model of system health airborne systems (AMK) special forces that affect the safety of operations on the basis of the expenditure patterns of Markov additive-resource. The resource system instead of the AMK is its operation, namely, the State vector of the system settings change the vector of phase, the AMK coordinates the AMK, vector perturbations of environmental parameters, moments of failures of elements (blocks, aggregates) system of the AMK, etc. Believe that moments of failure is the major cause of loss of efficiency the AMK. Analysis of the loss of efficiency of the AMK because of its failure.

Key words: additivity, the system of special-purpose systems, airborne operation, the vector of parameters, the vector of phase perturbation parameter, the vector of coordinates, vector perturbations of environmental parameters, system failure, the intensity perturbation, a method of mathematical induction.

УДК 629.7.075

Бецков, А. В.

О возможной модели утраты работоспособности системы аэромобильных комплексов специального назначения / А. В. Бецков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 3–8.