

УДК 351.814.334

## ПОКАЗАТЕЛЬ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Э.А. БОЛЕЛОВ, К.Н. МАТЮХИН, Н.Н. МАЙЛОВ

**Статья представлена доктором физико-математических наук, профессором  
Козловым А.В.**

В статье рассматривается понятие информационно-технического состояния комплекса средств передачи информации, входящего в состав автоматизированной системы управления воздушным движением, а также дается определение устойчивости функционирования комплекса и рассматривается способ формирования показателя устойчивости.

**Ключевые слова:** информационно-техническое состояние, комплекс средств передачи информации, показатель устойчивости.

### Введение

Современная автоматизированная система управления воздушным движением (АС УВД) является информационно-вычислительной системой сетевого типа и предназначена для обеспечения безопасности, повышения экономичности и регулярности полетов авиации различных ведомств в районе аэродрома, на воздушных трассах и во внетрассовом воздушном пространстве путем автоматизации процессов текущего планирования, сбора, обработки и отображения радиолокационной информации, информации, полученной по каналам автоматического зависимого наблюдения и метеоинформации [1].

Одной из характерных особенностей современных АС УВД является территориальная распределенность компонентов системы, что, в свою очередь, требует использования разнотипных каналов связи. Комплекс средств связи и передачи информации (КСПИ), входящий в состав АС УВД, использует магистральные каналы связи, проводные и беспроводные линии связи.

Основными задачами, решаемыми КСПИ, являются:

- сбор данных от источников информации (трассовые и аэродромные радиолокаторы, автоматические пеленгаторы, комплексы радиолокационной системы посадки (РСП), транспондеры системы автоматического зависимого наблюдения (АЗН) и др.);
- обработку информации, ее кодирование и декодирование;
- сопряжение с каналами связи;
- передачу информации по каналам связи;
- выдачу информации потребителям.

Таким образом, в любом из вариантов исполнения АС УВД одним из основных элементов системы является КСПИ. Для обеспечения надежности в комплект КСПИ входят по две станции приема/передачи информации: основная и резервная. КСПИ обеспечивается средствами контроля, диагностирования и управления техническим состоянием, а также программно-аппаратными средствами защиты от несанкционированного доступа. КСПИ современной АС УВД является сложной технической системой. Для оценки эффективности КСПИ используются ряд частных показателей эффективности (целевых, надежность, надежность, надежность).

временных) [1], отличительной особенностью которых является определенная степень дублирования учитываемых свойств комплекса, что в конечном итоге затрудняет реальную оценку эффективности КСПИ.

Вместе с тем, для эффективного управления воздушным движением наиболее важное значение имеет устойчивое функционирование КСПИ. Под устойчивостью функционирования КСПИ понимают способность системы выполнять установленный объем своих функций при внешних и внутренних дестабилизирующих воздействиях, не предусмотренных условиями нормального применения, а также способность противостоять таким воздействиям (выбор наилучшего режима функционирования, перестройка структуры, изменение функций подсистем).

Как всякая сложная техническая система КСПИ обладает избыточностью, прежде всего структурной (наличие резервных устройств в составе комплекса) и функциональной (наличие разнотипных каналов связи). Структурная и функциональная избыточность влияет на устойчивость функционирования КСПИ и определяются структурой комплекса. На устойчивость функционирования КСПИ оказывают влияние также характеристики обеспечивающих подсистем (подсистема контроля, диагностики и управления техническим состоянием, подсистема защиты информации), различные внешние и внутренние информационные и физические дестабилизирующие воздействия.

Таким образом, показатель, характеризующий устойчивость функционирования КСПИ должен зависеть от структуры и выходных характеристик системы, характеристик обеспечивающих подсистем, внешних и внутренних информационных и физических дестабилизирующих воздействий.

Целью настоящей работы является формулировка показателя устойчивости КСПИ, в которой были бы учтены эти факторы.

Под информационно-техническим состоянием (ИТС) КСПИ будем понимать совокупность свойств и признаков как технического, так и информационного характера, присущих системе в определенный момент времени [4].

## 1. Модель информационно-технического состояния КСПИ

В общем виде модель ИТС КСПИ может быть представлена вектором:

$$\mathbf{S}(t) = \{\mathbf{S}_и(t), \mathbf{S}_т(t)\}, \quad (1)$$

где:  $\mathbf{S}_и(t)$  - вектор информационного состояния КСПИ;  $\mathbf{S}_т(t)$  - вектор технического состояния КСПИ.

КСПИ, как показано выше, состоит из подсистем, устройств, линий связи и т.д., которые в дальнейшем для простоты будем называть элементами системы. Тогда модель ИТС КСПИ может быть сформирована на основе моделей ИТС составляющих ее элементов. Применительно к элементу КСПИ достаточно полной моделью ИТС является модель [2,4]:

- с тремя несовместными техническими состояниями  $s_{тj}, \tilde{s}_{тj}, \bar{s}_{тj}$ , где  $s_{тj}$  - работоспособное состояние  $j$ -го элемента,  $\tilde{s}_{тj}$  - состояние временного отказа  $j$ -го элемента,  $\bar{s}_{тj}$  - состояние полного устойчивого отказа  $j$ -го элемента;

- с тремя несовместными информационными состояниями:  $s_{иj}, \tilde{s}_{иj}, \bar{s}_{иj}$ , где  $s_{иj}$  - безопасное информационное состояние,  $\tilde{s}_{иj}$  - потенциально опасное информационное состояние,  $\bar{s}_{иj}$  - опасное или критическое информационное состояние.

Учитывая это, вектор ИТС  $j$ -го элемента КСПИ имеет вид:

$$\mathbf{S}_j(t) = \mathbf{S}_{тj}(t) \otimes \mathbf{S}_{иj}(t), \quad (2)$$

где:  $\mathbf{S}_{tj}(t) = [s_{tj}(t), \tilde{s}_{tj}(t), \bar{s}_{tj}(t)]^T$  - вектор технического состояния  $j$ -го элемента системы;  $\mathbf{S}_{ij}(t) = [s_{ij}(t), \tilde{s}_{ij}(t), \bar{s}_{ij}(t)]^T$  - вектор информационного состояния  $j$ -го элемента системы;  $\otimes$  - символ прямого произведения матриц.

Тогда, для  $j$ -го элемента системы модель ИТС будет включать девять несовместных состояний:

$$\mathbf{S}_j(t) = \begin{bmatrix} s_{ij}(t)s_{tj}(t) \\ s_{ij}(t)\tilde{s}_{tj}(t) \\ s_{ij}(t)\bar{s}_{tj}(t) \\ \tilde{s}_{ij}(t)s_{tj}(t) \\ \tilde{s}_{ij}(t)\tilde{s}_{tj}(t) \\ \tilde{s}_{ij}(t)\bar{s}_{tj}(t) \\ \bar{s}_{ij}(t)s_{tj}(t) \\ \bar{s}_{ij}(t)\tilde{s}_{tj}(t) \\ \bar{s}_{ij}(t)\bar{s}_{tj}(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Первое ИТС элемента системы  $s_{tj}(t)s_{ij}(t)$  является состоянием, при котором элемент КСПИ находится в работоспособном техническом состоянии и безопасном информационном состоянии, т.е. имеет место его штатное функционирование. Последнее ИТС элемента системы  $\bar{s}_{tj}(t)\bar{s}_{ij}(t)$  является состоянием, при котором элемент КСПИ полностью неработоспособен и находится в опасном информационном состоянии. Остальные ИТС элемента системы – это промежуточные состояния, характеризующиеся различной степенью работоспособности и безопасности элемента КСПИ.

Общее число ИТС КСПИ определяется числом элементов системы:

$$N = \prod_{j=1}^J q_j^{N_j}, \quad (4)$$

где  $q_j$  - число ИТС  $j$ -го элемента системы;  $N_j$  - число элементов системы, имеющих  $q_j$  ИТС;  $J$  - количество групп элементов КСПИ.

Выражение (4) учитывает тот факт, что элементы КСПИ могут иметь различное число ИТС. Например,  $(j+1)$ -й элемент системы может иметь два несовместных технических  $s_{tj+1}(t)$ ,  $\bar{s}_{tj+1}(t)$  состояния и три несовместных информационных  $s_{ij+1}(t)$ ,  $\tilde{s}_{ij+1}(t)$ ,  $\bar{s}_{ij+1}(t)$  состояния. Тогда общее число ИТС  $(j+1)$ -го элемента, в соответствии с (2), будет равно шести. К тому же, в КСПИ можно выделить ряд элементов, имеющих только техническую или только информационную компоненту модели ИТС.

Введем конечное множество информационно-технических состояний  $\Omega$ , которое содержит элементы трех типов. Элементы первого типа принадлежат подмножеству работоспособных ИТС  $\Omega_1$ , элементы второго типа принадлежат подмножеству частично работоспособных ИТС  $\Omega_2$ , элементы третьего типа принадлежат подмножеству полностью неработоспособных ИТС  $\Omega_3$ .

Подмножество работоспособных ИТС  $\Omega_1$  характеризуется тем, что значения технических и информационных параметров сохраняются на уровне, который обеспечивает выполнение заданных КСПИ функций в соответствии с предъявляемыми к ней требованиями (включая требования по информационной безопасности):

$$\Omega_1 = \Omega_{mp} \cap \Omega_{уб}, \quad (5)$$

где:  $\Omega_{mp}$  - множество технических работоспособных состояний;  $\Omega_{уб}$  - множество информационных безопасных состояний.

Подмножество частично работоспособных ИТС  $\Omega_2$  характеризуется тем, что КСПИ выполняет все жизненно важные функции и не выполняет некоторую допустимую часть иных функций или выполняет функции с худшим качеством:

$$\Omega_2 = \Omega_{mчр} \cup \Omega_{учб}, \quad (6)$$

где:  $\Omega_{mчр}$  - множество технических частично работоспособных состояний;  $\Omega_{учб}$  - множество информационных частично безопасных состояний.

Подмножество полностью неработоспособных ИТС  $\Omega_3$ , характеризуется как:

- множество технически неработоспособных, но безопасных состояний  $\Omega_{тнр}$ ;

- множество работоспособных или частично работоспособных технических состояний, но критических информационных состояний  $\Omega_{икр}$ .

Тогда:

$$\Omega_3 = \Omega_{тнр} \cup \Omega_{икр}. \quad (7)$$

Для  $j$ -го элемента системы (3) подмножество  $\Omega_1$  имеет мощность равную единице, т.е. включает только один элемент -  $s_{ij}(t)s_{ij}(t)$ . Подмножество  $\Omega_2$  состоит из трех элементов -  $s_{ij}(t)\tilde{s}_{ij}(t)$ ,  $\tilde{s}_{ij}(t)s_{ij}(t)$ ,  $\tilde{s}_{ij}(t)\tilde{s}_{ij}(t)$ . Остальные элементы принадлежат подмножеству  $\Omega_3$ .

Процесс перехода КСПИ из одного ИТС в другое является достаточно сложным. Сложность эта обусловлена, прежде всего спецификой функционирования КСПИ, отказами и сбоями в работе КСПИ, которые приводят к полной или частичной потере работоспособности системы, а также к нарушениям информационного обмена между элементами системы и потере хранимой в системе информации, внешними информационными угрозами, человеческим фактором (ошибки персонала, эксплуатирующего КСПИ).

Случайный процесс  $S(t)$ , характеризующий смену ИТС КСПИ может принимать в любой момент времени  $t$  только какое-либо одно значение из конечного множества  $\Omega$  и поэтому представляет собой дискретный случайный процесс, смена состояний которого происходит в случайные моменты времени:

$$S(t) = F(S, \Xi_{внш}, \Xi_{внт}, t), \quad (8)$$

где  $\Xi_{внш} = [\Xi_{внш.инф}, \Xi_{внш.физ}]$  - вектор дестабилизирующих внешних воздействий, включающий в себя вектор дестабилизирующих внешних информационных воздействий  $\Xi_{внш.инф}$  и вектор дестабилизирующих внешних физических воздействий  $\Xi_{внш.физ}$ ;  $\Xi_{внт}$  - вектор дестабилизирующих внутренних воздействий;  $F(\cdot)$  - оператор преобразования.

В выражении (8)  $\Xi_{внш}$  и  $\Xi_{внт}$  являются независимыми по моменту времени и характеристикам воздействий. Это допущение объясняется различной природой этих воздействий. При более детальном рассмотрении можно говорить о некоторой корреляции между внутренними воздействиями и внешними информационными воздействиями, а также между внутренними воздействиями и внешними физическими воздействиями.

Переходы между состояниями могут быть описаны матрицей вероятностей переходов КСПИ из одного ИТС в другое:

$$P_S(t) = [p(t, s_i, s_j)], \quad (9)$$

где:  $p(t, s_i, s_j)$  - вероятность перехода из  $i$ -го состояния в  $j$ -е состояние.

## 2. Показатель устойчивости КСПИ

В качестве показателя устойчивости функционирования КСПИ введем коэффициент устойчивости  $CS$  (coefficient of stability) [3]. Значение коэффициента устойчивости  $CS$  зависит от структуры КСПИ  $STR$  и параметров, характеризующих его качество  $\{z_{ti}, z_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j = \overline{1, J}$ , где  $z_{ti}$  - технические параметры,  $z_{ij}$  - информационные параметры (скорость передачи данных, объем сообщений, формат сообщений (тип данных, способ кодирования)). Пусть на каждый параметр задана некоторая область их допустимых значений  $d$ . Тогда коэффициент устойчивости можно представить как функционал вида:

$$CS = F\left(STR, \left(\bigcap_{i=1}^I z_{ti} \in d_{ti}\right) \cap \left(\bigcap_{j=1}^J z_{ij} \in d_{ij}\right)\right). \quad (10)$$

В выражении (4) параметры комплекса разделены на технические и информационные, соответственно. Условие  $\bigcap_{i=1}^I z_{ti} \in d_{ti}$  определяет факт одновременного выполнения технических требований к КСПИ, а условие  $\bigcap_{j=1}^J z_{ij} \in d_{ij}$  - информационных.

Принадлежность информационно-технического состояния КСПИ подмножеству  $\Omega_1$  фиксируется в том случае, когда  $CS \geq CS_{tr}$ , где  $CS_{tr}$  - требуемое значение коэффициента устойчивости. При этом для двух различных информационно-технических состояний  $k$  и  $m$  подмножества  $\Omega_1$  выполняется условие  $CS_k \geq CS_m$ . Другими словами говоря, это означает, что информационно-технические состояния с точки зрения устойчивости являются линейно упорядоченными. Для линейных структур существует верхняя и нижняя границы множества элементов. Учитывая, что функционал (10) является вещественной функцией, верхняя и нижняя границы определяются максимальным и минимальным значениями коэффициента устойчивости  $\max CS$  и  $\min CS$ . Эти значения определяются различной структурой КСПИ. При фиксированных значениях технических и информационных параметров можно получить оценки верхней и нижней границы коэффициента устойчивости в виде:

$$CS^* = \max_{\{STR\}} F\left(STR, \left(\bigcap_{i=1}^I z_{ti} \in d_{ti}\right) \cap \left(\bigcap_{j=1}^J z_{ij} \in d_{ij}\right)\right), \quad (11)$$

$$CS^{**} = \min_{\{STR\}} F\left(STR, \left(\bigcap_{i=1}^I z_{ti} \in d_{ti}\right) \cap \left(\bigcap_{j=1}^J z_{ij} \in d_{ij}\right)\right). \quad (12)$$

Значения верхних и нижних оценок коэффициента устойчивости при наилучшем значении информационно-технических параметров комплекса имеют вид:

$$CS^* = \max_{\{STR\}} \max_{\{z_t, z_u\}} F(STR, z_t, z_u), \quad (13)$$

$$CS^{**} = \min_{\{STR\}} \max_{\{z_t, z_u\}} F(STR, z_t, z_u). \quad (14)$$

Нарушение хотя бы одного требования к техническим параметрам  $\bigcap_{i=1}^I z_{ti} \in d_{ti}$  или информационным параметрам  $\bigcap_{j=1}^J z_{ij} \in d_{ij}$  означает, что информационно-техническое состояние

КСПИ будет относиться к подмножеству  $\Omega_2$ . Значение коэффициента устойчивости при этом будет меньше величин, полученных в выражениях (13) и (14).

Подсистема защиты информации и подсистема контроля, диагностирования и управления техническим состоянием характеризуются рядом показателей  $x_n$ ,  $n = \overline{1, N}$  и  $y_m$ ,  $m = \overline{1, M}$ , соответственно. Например, подсистема защиты информации характеризуется криптостойкостью алгоритмов шифрования, вероятностью обнаружения угроз, скоростью реагирования на угрозу и т.п., подсистема контроля, диагностирования и управления техническим состоянием характеризуется достоверностью контроля и диагностирования, полнотой контроля, глубиной диагностирования.

Учитывая показатели обеспечивающих подсистем, выражения (13) и (14) примут вид:

$$CS^* = \max_{\{STR\}} \max_{\{z_T, z_U\}} F(x_n, y_m | STR, z_T, z_U), \quad (15)$$

$$CS^* = \min_{\{STR\}} \max_{\{z_T, z_U\}} F(x_n, y_m | STR, z_T, z_U). \quad (16)$$

Из выражений (15) и (16) вытекают две задачи:

- 1) нахождение зависимости коэффициента устойчивости  $CS(x_n, y_m, STR)$  от показателей  $x_n$  и  $y_m$ ;
- 2) оценка значения коэффициента устойчивости  $CS(x_n, y_m, STR)$  с учетом зависимости от показателей  $x_n$  и  $y_m$ .

Первая задача является задачей построения математической модели коэффициента устойчивости КСПИ. Вторая задача сводится к получению оценки значения коэффициента устойчивости при заданных значениях параметров  $z_{Tj}$  и  $z_{Uj}$  и выбранной структуре КСПИ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации: Учеб. пособие/ Р.М. Ахмедов, А.А. Бибутов, А.В.Васильев и др.; Под ред. С.Г. Пятко и А.И. Красова. – СПб.: Политехника, 2004.
2. Ярлыков М.С., Богачев А.С. Авиационные радиоэлектронные комплексы. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2000.
3. Воскобоев В.Ф., Рейхов Ю.Н., Лебедев А.Ю. О выборе показателя устойчивости функционирования объекта ТЭК // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. М.: ВЦ РАН, Вып. 7, 2005.
4. Болелов Э.А., Матюхин К.Н., Сбитнев А.В., Шалупин С.В. Информационно-технические состояния автоматизированной системы управления воздушным движением. М.: Научный вестник МГТУ ГА, №217, 2015.

#### Сведения об авторах

**Болелов Эдуард Анатольевич** (1967 г.р.) – доцент, кандидат технических наук, заведующий кафедрой технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, окончил Военно-воздушную инженерную академию им. Н.Е. Жуковского (1997), автор 40 научных работ, область научных интересов – эксплуатация сложных технических систем, обработка информации в навигационных комплексах, электронный адрес: e.bolelov@mstuca.aero.

**Матюхин Константин Николаевич** (1976 г.р.) - кандидат технических наук, доцент кафедры основ радиотехники и защиты информации МГТУ ГА, окончил ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (2005), автор 37 научных работ, область научных интересов – эксплуатация сложных технических систем, электронный адрес: k.matuhin@mstuca.aero.

**Майлов Назар Назарович** (1963 г.р.) – доцент кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ, окончил Военный инженерный краснознаменный институт им. А.Ф. Можайского (1985), автор 4 научных работ, область научных интересов – эксплуатация сложных технических систем, электронный адрес: majlov@mail.ru.

## THE INDICATOR OF STABILITY OF FUNCTIONING OF THE COMPLEX MEDIA OF THE AUTOMATED SYSTEM OF AIR TRAFFIC CONTROL (ABSTRACTS)

**Bolelov E.A.** Moscow State Technical University of Civil Aviation (e.bolelov@mstuca.aero)

**Matyukhin K. N.** Moscow State Technical University of Civil Aviation (k.matuhin@mstuca.aero)

**Mailov N. N.** Moscow State Technical University of Civil Aviation (majlov@mail.ru)

**Keywords:** information technology status, the complex transmission medium, the index of stability.

The article discusses the concept of information and technical state media, which is part of the automated system of air traffic control, as well as the definition of stability of functioning of the complex and a method of forming a resilience index.

### REFERENCES

1. Automated systems of air traffic control: New information technologies in aviation: Textbook. manual/ **R. M. Akhmedov, A. A. Bebutov, A. V. Vasiliev and others**; Under the editorship of S. G. heels and A. I. Krasova. – SPb.: University of technology, 2004.
2. **Yarlykov M. S., Bogachev A. S.** Aviation radio-electronic complexes. – M.: VVIA im. prof. N.E. Zhukovsky, 2000.
3. **Voskoboev V. F., Reich, J. N., Lebedev, A. Yu.**, On the choice of the indicator of stability of functioning of the FEC object // theory of security and stability of systems. Moscow: computing centre of RAS, Vol. 7, 2005.
4. **Bolelov E. A., Matyukhin, K. N., Sbitnev A. V., Chalopin S. V.** Information and technical state automated system of air traffic control. M.: Scientific Bulletin of MSTUCA, No. 217, 2015.