

УДК 629.735.017.1:389.1

М.Ю. ЯКОВЛЕВ*Львовский институт Сухопутных Войск им. Петра Сагайдачного
Национального университета “Львовская политехника”, Украина*

КОМПЛЕКС ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЁЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ АВИАЦИОННЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Статья посвящена выбору и теоретическому обоснованию комплекса показателей метрологической надёжности средств измерительной техники авиационных радиотехнических систем.

метрологическая надёжность, комплекс показателей, нестабильность, метрологическая характеристика, средства измерительной техники, авиационные радиотехнические системы

Введение

Постановка проблемы. Надёжность средств измерительной техники (СИТ) существенно влияет на надёжность авиационных радиотехнических систем (АРТС), для определения технического состояния которых они используются. Поэтому проблема оценки и повышения надёжности СИТ АРТС является актуальной [1, 2]. Одной из задач этой проблемы является выбор и теоретическое обоснование комплекса показателей метрологической надёжности СИТ АРТС. Решению данной задачи посвящена статья.

Анализ литературы. Первые работы по вопросам надёжности СИТ начали появляться с 1955 года [3, 4]. Проведенные исследования авторами этих и последующих работ [5 – 12] показали, что математический аппарат, разработанный для широкого класса радиоэлектронных устройств, не может быть применен для оценки метрологической надёжности средств измерительной техники (и в частности, для СИТ АРТС). Это обусловлено, прежде всего, их спецификой – метрологическими свойствами, связью между показателями надёжности и точности СИТ. Для оценки метрологической надёжности СИТ предложен ряд показателей. Среди них можно выделить: показатель информационной надёжности

[4], показатель доли верных измерений с учетом постепенных метрологических отказов [7], показатели частоты отказов и скорости изменения частоты отказов [8 – 10], метрологический ресурс [11, 12] и ряд других. Однако предложенные показатели не находят широкого применения для средств измерительной техники АРТС из-за их разобщённости, а предложенные методики оценки этих показателей не всегда являются оптимальными, так как не учитывают связь между метрологической надёжностью и стабильностью средств измерительной техники АРТС, а также специфику эксплуатации средств измерительной техники авиационных радиотехнических систем.

Цель статьи. Выбрать и теоретически обосновать комплекс показателей метрологической надёжности средств измерительной техники авиационных радиотехнических систем.

Изложение материала

Метрологическая исправность СИТ АРТС заключается в соответствии значений его метрологических характеристик (МХ) установленным нормам. В общем случае значение МХ СИТ АРТС $\eta(t)$ в момент времени t равно [12]:

$$\eta(t) = \eta(0) + \xi(t), \quad (1)$$

где $\xi(t)$ – нестабильность МХ СИТ АРТС за время t ;

$\eta(0)$ – начальное значение МХ СИТ АРТС, зависящее от точности процесса изготовления СИТ.

Начальное значение МХ СИТ АРТС $\eta(0)$ является случайной величиной, имеющей плотность распределения $f_0(\eta)$, математическое ожидание m_0 и СКО σ_0 . Так как начальное значение МХ СИТ АРТС $\eta(0)$ и нестабильность МХ СИТ АРТС $\xi(t)$ взаимно независимы, то распределение $f_0(\eta)$ значений $\eta(t)$ является сверткой распределений $f_0(\eta)$ и $\varphi_t(\xi)$:

$$f_t(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} f_0(\eta - \xi) \varphi_t(\xi) d\xi, \quad (2)$$

где $\varphi_t(\xi)$ – плотность распределения нестабильности МХ СИТ АРТС за время t .

Используя вероятность $f_t(\eta)$, определенную из соотношения (1), можно получить аналитические соотношения для комплекса показателей метрологической надёжности СИТ АРТС. Однако все эти расчетные зависимости можно существенно упростить, если принять во внимание следующее. Наиболее важные для потребителя МХ (такие как систематическая составляющая основной погрешности СИТ АРТС) подвергаются корректировке после изготовления СИТ АРТС путем проведения первичной поверки на заводе-изготовителе. Учитывая, что именно по таким МХ и оценивается метрологическая надёжность СИТ АРТС, преобразуем выражение (1). Если СИТ АРТС после изготовления подвергается поверке, то функция $\eta(0)$ будет равняться погрешности поверки СИТ АРТС. Сравним дисперсию начальной нестабильности МХ СИТ АРТС $\sigma^2(0)$ и дисперсию погрешности поверки СИТ АРТС σ_0^2 . Разброс значений начальной нестабильности, полученных при испытаниях СИТ АРТС, обусловлен двумя факторами: основным, а именно случайными колебаниями значений нестабильности

по совокупности СИТ АРТС данного типа и характеризующимся дисперсией σ_n^2 ; дополнительным, или погрешностью измерений МХ СИТ АРТС, обусловленной погрешностью эталонов, применяемых при измерениях, кратковременной нестабильностью МХ СИТ АРТС, колебаниями условий измерений в границах нормальной области значений влияющих величин и т.д. Очевидно, что дисперсия погрешности измерения МХ СИТ АРТС будет равна дисперсии поверки σ_0^2 . Так как нестабильность МХ СИТ АРТС за время t определяется как размерность результатов двух измерений МХ СИТ АРТС (в конце и начале периода $[0, t]$), дисперсия погрешности экспериментальной оценки нестабильности равна $2\sigma_0^2$. Следовательно, запишем неравенство:

$$\sigma^2(0) = \sigma_n^2 + 2\sigma_0^2 \gg \sigma_0^2. \quad (3)$$

Тогда, пренебрегая дисперсией σ_0^2 ввиду ее сравнительной малости, увидим, что распределение $f_0(\eta)$ вырождается в δ -распределение (детерминированное значение):

$$f_0(\eta) = \delta(m_0), \quad (4)$$

и соответственно

$$f_t(\eta) = \varphi_t(\eta + m_0). \quad (5)$$

Учитывая формулу (5), в дальнейшем изложении мы будем придерживаться прежних обозначений, но понимать под $\varphi_t(\xi)$, в зависимости от решаемой задачи, плотность распределения нестабильности МХ СИТ АРТС за время t или значений МХ СИТ АРТС в момент t . При этом подразумевается, что в последнем случае $\varphi_t(\xi)$ имеет математическое ожидание $m(t)$, равное сумме m_0 и средней нестабильности МХ СИТ АРТС за время t .

В комплекс показателей метрологической надёжности СИТ АРТС входят два вида показателей. К первому виду показателей метрологической надёжности СИТ АРТС отнесём: вероятность метрологической исправности СИТ АРТС, коэффициент

метрологической исправности СИТ АРТС, интенсивность метрологических отказов СИТ АРТС, вероятность работы СИТ АРТС без метрологических отказов, гамма-процентная наработка до метрологического отказа СИТ АРТС и установленная наработка до метрологического отказа СИТ АРТС. Вторым видом показателей метрологической надёжности СИТ АРТС включает в себя такие показатели, как: средняя наработка до метрологического отказа СИТ АРТС, параметр потока метрологических отказов СИТ АРТС и средняя наработка на метрологический отказ СИТ АРТС.

Рассмотрим и дадим краткую характеристику перечисленных выше показателей метрологической надёжности СИТ АРТС.

Особое место среди показателей метрологической надёжности СИТ АРТС занимают *вероятность метрологической исправности* $P_{ми}(t)$ и *коэффициент метрологической неисправности* $K_{ми}(t)$ СИТ АРТС.

В зависимости от рассматриваемого периода времени они характеризуют метрологическую надёжность до первой поверки (калибровки), либо между периодическими поверками (калибровками), то есть без учета или с учетом эффекта периодического восстановления метрологической исправности СИТ АРТС.

Вероятность метрологической исправности СИТ АРТС равна вероятности того, что в момент времени t все его нормируемые МХ соответствуют установленным требованиям:

$$P_{ми}(t) = \int_{-\Delta}^{\Delta} \varphi_t(\xi) d\xi = \Phi[G(t, \Delta)] - \Phi[G(t, -\Delta)], \quad (6)$$

где Δ – предел допускаемых значений МХ СИТ АРТС;

$G(t, \Delta)$, $G(t, -\Delta)$ – функция дрейфа верхней и нижней границы области допускаемых значений МХ СИТ АРТС за время t , соответственно;

$\Phi[G(...)]$ – функция Лапласа значений $G(t, \Delta)$ и $G(t, -\Delta)$.

Если в качестве интервала t принять значение межповерочного интервала T , то вероятность метрологической исправности СИТ АРТС $P_{ми}(T)$ будет равна средней доле СИТ АРТС, пришедших на поверку метрологически исправными. Отсюда следует простота статистической оценки показателя $P_{ми}(T)$ по результатам проверок и, следовательно, целесообразность его применения для характеристики эффективности поверки СИТ АРТС.

Коэффициент метрологической исправности СИТ АРТС $K_{ми}(t)$ равен отношению математического ожидания времени пребывания СИТ АРТС в метрологически исправном состоянии за период $[0, t]$ к длительности τ этого периода:

$$K_{ми}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t [\Phi(G(\tau, \Delta)) - \Phi(G(\tau, -\Delta))] d\tau. \quad (7)$$

Показатель метрологической надёжности $K_{ми}(t)$ характеризует состояние СИТ АРТС не в момент времени t , а в среднем за некоторый период (обычно межповерочный интервал), и равен средней за этот период вероятности метрологической исправности СИТ АРТС.

Интенсивность метрологических отказов СИТ АРТС $\lambda(t)$ в момент времени t равна сумме интенсивностей ($\lambda_{-\Delta}(t)$ и $\lambda_{\Delta}(t)$) выхода значений МХ СИТ АРТС в момент времени t за границы $-\Delta$ и Δ , соответственно:

$$\lambda(t) = \lambda_{-\Delta}(t) + \lambda_{\Delta}(t). \quad (8)$$

Каждая из интенсивностей $\lambda_{-\Delta}(t)$ и $\lambda_{\Delta}(t)$ в выражении (8) равна произведению плотности распределения значений МХ СИТ АРТС $\varphi_t''(-\Delta)$ (или $\varphi_t''(\Delta)$), не отказавших до этого момента времени, в граничной точке $-\Delta$ (или Δ) на абсолютное значение интенсивности дрейфа МХ СИТ АРТС в этой точке $\mu(t, -\Delta)$ (или $\mu(t, \Delta)$), если интенсивность

дрейфа направлена за пределы области допускаемых значений МХ СИТ АРТС, и равна нулю в противном случае, т.е.:

$$\lambda_{-\Delta}(t) = \begin{cases} |\mu(t, -\Delta)| \varphi_t''(-\Delta), & \mu(t, -\Delta) < 0; \\ 0, & \mu(t, -\Delta) \geq 0; \end{cases} \quad (9)$$

$$\lambda_{\Delta}(t) = \begin{cases} |\mu(t, \Delta)| \varphi_t''(\Delta), & \mu(t, \Delta) > 0; \\ 0, & \mu(t, \Delta) \leq 0. \end{cases} \quad (10)$$

Необходимыми условиями отличия от нуля интенсивностей дрейфа МХ СИТ АРТС $\lambda_{-\Delta}(t)$ и $\lambda_{\Delta}(t)$ являются следующие соотношения:

$$\mu(t, \Delta) > 0; \mu(t, -\Delta) < 0; \quad (11)$$

$$G(t, \Delta) = \min_{0 \leq \tau \leq t} [G(\tau, \Delta)]; \quad (12)$$

$$(G(t, -\Delta) = \min_{0 \leq \tau \leq t} [G(\tau, -\Delta)]), \quad (13)$$

где $G(\tau, \Delta)$, $G(\tau, -\Delta)$ – функция дрейфа верхней и нижней границы области допускаемых значений МХ СИТ АРТС за время $t = \tau$.

Теоретически обоснована зависимость от времени вероятности работы СИТ АРТС без метрологических отказов:

$$P(t) = \Phi[B(t)] - \Phi[A(t)], \quad (14)$$

где $A(t)$ и $B(t)$ – функционалы от $G(\tau, -\Delta)$ и $G(\tau, \Delta)$:

$$A(t) = \max_{0 \leq \tau \leq t} [G(\tau, -\Delta)]; \quad (15)$$

$$B(t) = \min_{0 \leq \tau \leq t} [G(\tau, \Delta)]. \quad (16)$$

Примем, что *гамма-процентная наработка до метрологического отказа* T_{γ} СИТ АРТС – это наработка, соответствующая вероятности безотказной работы СИТ, равной 100γ процентов:

$$P(T_{\gamma}) = \gamma. \quad (17)$$

Частным случаем гамма-процентной наработки до метрологического отказа СИТ АРТС T_{γ} является *установленная наработка до метрологического отказа СИТ АРТС* $T_{уст}$, соответствующая значению $\gamma = 1,0$:

$$T_{уст} = \min(t_{-\Delta}, t_{\Delta}), \quad (18)$$

где $t_{-\Delta}$ – решение уравнения $A(t_{-\Delta}) = -4$; t_{Δ} – решение уравнения $B(t_{\Delta}) = 4$.

Введение гамма-процентной наработки до метрологического отказа T_{γ} и установленной наработки до метрологического отказа $T_{уст}$ СИТ АРТС в комплекс нормируемых показателей метрологической надёжности СИТ АРТС позволяет установить индивидуальные требования к метрологической надёжности каждого экземпляра СИТ АРТС и, следовательно, применять в отношении их надёжности стандартные методы управления технологическим процессом по критерию качества продукции.

Показатели МН измерительных приборов и многозначных мер. Для измерительных приборов и многозначных мер применение соотношений (1 – 18) обеспечивает лишь приближённую оценку их метрологической надёжности. Принято утверждение, что метрологическая надёжность измерительных приборов и многозначных мер определяется соответствием значений их МХ установленным нормам во всем диапазоне измерений.

Следствием этого утверждения является то, что метрологическим отказом измерительного прибора и многозначной меры является событие, заключающееся в том, что значение хотя бы одной из их нормируемых МХ хотя бы в одной точке диапазона измерений выйдет за установленные границы. С учётом принятых утверждений далее приведено обобщение соотношений (1 – 18) для измерительных приборов и многозначных мер.

Общая зависимость *средней наработки до метрологического отказа СИТ АРТС* T_{cp} от характеристик нестабильности МХ СИТ АРТС имеет вид:

$$T_{cp} = \int_{G(0, -\Delta)}^{G(\infty, -\Delta)} G^{-1}(\eta, -\Delta) \varphi(\eta) d\eta + \int_{G(0, \Delta)}^{G(\infty, \Delta)} G^{-1}(\eta, \Delta) \varphi(\eta) d\eta. \quad (19)$$

Получены простые расчетные выражения средней наработки до метрологического отказа СИТ для практически важных частных случаев дрейфа МХ СИТ:

– при линейном дрейфе МХ СИТ:

$$T_{cp} = \begin{cases} \frac{\Delta - m(0)}{m_v}, & m_v > 0; \\ -\frac{\Delta + m(0)}{m_v}, & m_v < 0, \end{cases} \quad (20)$$

где m_v – средняя скорость дрейфа МХ СИТ АРТС;

$m(0)$ – математическое ожидание при нулевых начальных условиях;

– при веерном дрейфе МХ СИТАРТС:

$$T_{cp} = \frac{1}{2r} \left[\ln \frac{\Delta^2 - m^2(0)}{\sigma^2(0)} + 0,27 \right], \quad (21)$$

где r – вспомогательная функция;

$\sigma(0)$ – СКО при нулевых начальных условиях.

Параметр потока метрологических отказов и средняя наработка на метрологический отказ СИТ авиационных радиотехнических систем. Общее аналитическое выражение для параметра потока метрологических отказов СИТ авиационных радиотехнических систем имеет следующий вид:

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^{\infty} f_i(t), \quad (22)$$

где $f_i(t)$ – плотность вероятности i -го метрологического отказа СИТ АРТС.

Найдены аналитические соотношения для параметра потока метрологических отказов СИТ при монотонном дрейфе МХ СИТ:

$$\omega(t) = \mu(t,0) \sum_{i=1}^{\infty} [\varphi_t(i\Delta) - \varphi_t(-i\Delta)] + r_1(t) \sum_{i=1}^{\infty} [\varphi_t(i\Delta) + \varphi_t(-i\Delta)] i\Delta, \quad (23)$$

где $r_1(t)$ – функция параметров среднеекватрической регрессии скорости изменения дрейфа МХ средств измерительной техники авиационных радиотехнических систем.

Для приближенной оценки параметра потока метрологических отказов средств измерительной техники авиационных радиотехнических систем получено аналитическое соотношение:

$$\omega(t) \cong \frac{\mu(t, m^+(t))}{\Delta} [1 - \Phi(G(t,0))] - \frac{\mu(t, m^-(t))}{\Delta} - \Phi(G(t,0)), \quad (24)$$

где $m^+(t)$, $m^-(t)$ – условные математические ожидания приращения МХ СИТ АРТС за время t в положительном и отрицательном направлениях соответственно; $\mu(t, m^{+(-)}(t))$ – условное математическое ожидание скорости изменения средней нестационарности МХ СИТ АРТС в положительном и отрицательном направлениях.

Параметр потока метрологических отказов, как показатель метрологической надёжности СИТ АРТС, имеет смысл только при мгновенном восстановлении отказавшего СИТ АРТС. Применение показателя $\omega(t)$ целесообразно, если СИТ подвергается непрерывному контролю метрологической исправности. Такой контроль может иметь место при эксплуатации СИТ АРТС.

Установлена взаимосвязь параметра потока метрологических отказов СИТ АРТС со средней наработкой на метрологический отказ $T(t)$ СИТ АРТС. Средняя наработка на метрологический отказ СИТ АРТС характеризует среднее число метрологических отказов СИТ АРТС в интервале $[0, t]$:

$$T(t) = \frac{t}{\int_0^t \omega(t_m) dt_m}, \quad (25)$$

где $\omega(t_m)$ – параметр потока метрологических отказов в момент времени t_m из интервала $[0, t]$.

Применение средней наработки на метрологический отказ средств измерительной техники АРТС целесообразно только для конкретных значений временного интервала t .

Вывод

Таким образом, в статье выбран и теоретически обоснован комплекс показателей метрологической надёжности средств измерительной техники авиационных радиотехнических систем. Установлены аналитические зависимости показателей метрологической надёжности СИТ авиационных радиотехнических систем от характеристик их нестабильности.

Дальнейшие исследования планируется направить на разработку и исследование методов оценки и повышения метрологической надёжности СИТ авиационных радиотехнических систем с использованием предложенного комплекса показателей метрологической надёжности средств измерительной техники авиационных радиотехнических систем.

Литература

1. Прибылев Ю.Б., Волобуев А.П., Яковлев М.Ю. К вопросу об оценке метрологической надёжности средств измерительной техники авиационных радиотехнических систем // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2006. – Вып. 7 (19). – С. 143-146.
2. Яковлев М.Ю., Семеренко Ю.О., Адаменко С.В. Питання підвищення метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки авіаційних радіотехнічних систем на етапі проектування // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 2 (6). – С. 45-48.
3. Hayes I. Technical memorandum № 63-106 “Factors affecting measurement reliability” // U.S. Naval Ordnance Laboratory, Corona, CA, October 1955.
4. Мандельштам СМ. Информационная надёжность // Труды Ленинградского института авиационного приборостроения. – 1966. – Вып. 48. – С. 102-109.

5. Фридман А.Э. Теория метрологической надёжности средств измерений // Измерительная техника. – 1991. – № 11. – С. 3-10.

6. Yakovlev M.Y., Volobuyev A.P. Evaluation of the metrological reliability of the means of measuring techniques of the aircraft radio systems // Proceedings of the International conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science”, (February 28 – March 4, 2006, Lviv – Slavske). – P. 591-592.

7. Зеленцов Б.П. О специфике надёжности средств измерений // Измерительная техника. – 1971. – № 2. – С. 92-94.

8. Сотсков Б.С. Надёжность автоматических устройств и систем. Её обеспечение и методы оценки // Приборы и системы управления. – 1973. – № 4. – С. 10-13.

9. Лабунец В.С., Маркович А.Б., Осадчая Л.Г. Изменение надёжности электроизмерительных приборов при их длительной эксплуатации // Измерительная техника. – 1974. – № 3. – С. 59-60.

10. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

11. Чернышова Т.И., Шиндяпин Д.А. Повышение метрологического ресурса при проектировании средств неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий // Контроль. Диагностика. – 2002. – № 10 (52). – С. 27-31.

12. Мищенко С.В., Цветков Э.И., Чернышова Т.И. Метрологическая надёжность измерительных средств. – М.: Машиностроение, 2001. – 96 с.

Поступила в редакцию 23.08.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.