

УДК 629.735.017.1:389.1

Ю.А. ФТЕМОВ

*Львовский институт Сухопутных войск
Национального университета “Львовская политехника”, Украина*

ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЁЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ АВИАЦИОННЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье изложен подход к повышению метрологической надёжности средств измерительной техники авиационных радиотехнических систем, основанный на структурно-функциональном резервировании, исследованы особенности и предложены основные пути его реализации, а также проанализированы отличия структурно-функционального резервирования от обычного резервирования, широко используемого в классической теории надёжности. На основе предложенного подхода рассмотрен алгоритм оценки показателей метрологической надёжности резервированной группы средств измерительной техники авиационных радиотехнических систем, состоящей из однотипных средств измерительной техники, в зависимости от кратности резервирования, характеристик нестабильности и взаимной корреляции процессов дрейфа средств измерительной техники авиационных радиотехнических систем из состава резервированной группы.

подход, метрологическая надёжность, средства измерительной техники, авиационные радиотехнические системы, структурно-функциональное резервирование

Введение

Постановка проблемы. Надёжность средств измерительной техники (СИТ) существенно влияет на надёжность авиационных радиотехнических систем (АРТС), для определения технического состояния которых они используются [1]. Поэтому проблема повышения надёжности СИТ АРТС является актуальной.

Анализ литературы. Большинство известных научных работ, посвященных вопросам повышения метрологической надёжности СИТ, направлено на решение специфических задач в конкретных предметных областях [2 – 4]. Общим недостатком перечисленных работ является то, что они не учитывают особенностей повышения метрологической надёжности СИТ АРТС.

Цель статьи: предложить подход к повышению метрологической надёжности СИТ АРТС, исследовать особенности и выявить основные пути его реализации, проанализировать отличия структурно-функционального резервирования от обычного ре-

зервирования, широко используемого в классической теории надёжности. На основе предложенного подхода к повышению метрологической надёжности СИТ АРТС, получить подход к оценке показателей метрологической надёжности резервированной группы СИТ АРТС, состоящей из однотипных СИТ АРТС, в зависимости от кратности резервирования, характеристик нестабильности СИТ АРТС, а также от взаимной корреляции процессов дрейфа СИТ АРТС из состава резервированной группы.

Изложение основного материала

Структурно-функциональное резервирование заключается в увеличении количества СИТ АРТС или их отдельных блоков, выполняющих общую функцию, по сравнению с их минимально необходимым числом, для повышения их стабильности и метрологической надёжности. Термин “структурно-функциональное резервирование” полностью отражает суть этого подхода, так как СИТ АРТС из состава метрологически резервированной группы не заменяют, а взаимно дополняют друг друга. Тем не ме-

нее, он вводится по аналогии с термином “функциональное резервирование” из классической надежности [5] из-за общности их назначения и конструктивного исполнения: в обоих случаях вводятся дополнительные элементы или блоки, избыточные для выполнения заданных функций, с целью повышения надёжности. Однако между этими подходами имеются и принципиальные отличия. Прежде всего, они направлены на предотвращение вредных последствий отказов разных видов – функциональных и параметрических. Функциональный отказ СИТ АРТС из состава метрологического резерва при последовательном соединении приведет к функциональному отказу всей группы СИТ АРТС, а при их параллельном соединении – к существенному изменению метрологической характеристики группы СИТ АРТС, то есть к её метрологическому отказу. Если средняя наработка до функционального отказа одного СИТ АРТС резервированной группы равна T_{cp} , то средняя наработка до функционального отказа одного из N СИТ АРТС, составляющих метрологический резерв, будет равна T_{cp}/N , или в N раз меньше. Следовательно, структурно-функциональное резервирование ухудшает функциональную надежность. Аналогично, метрологический отказ элемента функционального резерва, являясь скрытым, не будет зафиксирован и устранен. Автоматическая нейтрализация последствий этого отказа другими элементами резерва происходит только тогда, когда функциональный отказ является нагруженным (основной и резервные элементы группы работают в одинаковом режиме). Но это исключение, так как при этой схеме резервирования функциональный резерв одновременно является и метрологическим резервом. Ненагруженное функциональное резервирование (режимы работы элементов, находящихся в резерве, легче, чем у основного элемента), являясь более эффективным средством повышения функциональной надёжности, в то же время, по крайней мере, не повышает метрологическую надёжность. Таким обра-

зом, положительный эффект структурно-функционального резервирования достигается за счет ухудшения функциональной надежности, и наоборот. Поэтому при обосновании параметров резервирования следует учитывать последствия для обоих видов отказов.

Структурно-функциональное резервирование, как и функциональное резервирование, может осуществляться на уровне элементов, блоков и СИТ АРТС в целом. Но в отличие от функционального резервирования, которое может быть нагруженным и ненагруженным, метрологический резерв всегда является нагруженным.

Ещё одной особенностью структурно-функционального резервирования является то, что оно может осуществляться как путем параллельного, так и путем последовательного или параллельно-последовательного соединений СИТ АРТС. Действительно, при последовательном соединении N одинаковых СИТ АРТС номинальное значение параметра такой метрологически резервированной цепи определяется, как:

$$k_N = Nk, \quad (1)$$

где k – номинальное значение параметра одного СИТ АРТС.

Поэтому можно записать выражения для абсолютной Δk_N и относительной δk_N погрешностей номинального значения параметра метрологически резервированной цепи СИТ АРТС:

$$\Delta k_N = N\Delta k, \quad (2)$$

где Δk – абсолютная погрешность номинального значения параметра одного СИТ АРТС из состава метрологически резервированной цепи;

$$\delta k_N = \frac{\Delta k_N}{k_N} = N \frac{\Delta k}{Nk} = N \frac{1}{N} \delta k. \quad (3)$$

Следовательно, при последовательном соединении N СИТ АРТС коэффициент влияния одного СИТ АРТС описывается выражением:

$$k_{\text{вл}} = \frac{1}{N}. \quad (4)$$

При параллельном соединении N_{nc} последовательных метрологически резервированных цепей, состоящих из одинаковых СИТ АРТС, номинальное значение параметра j -й цепи составит:

$$k_j = n_j k, \quad (5)$$

где n_j – число СИТ АРТС в j -й цепи.

Так как для параллельной цепи, состоящей из элементов, имеющих разные номинальные значения, справедливо следующее уравнение:

$$\frac{1}{k_N} = \sum_{j=1}^M \frac{1}{k_j}, \quad (6)$$

то в этом случае можно записать:

$$k_N = k \left/ \sum_{j=1}^{N_{nc}} \frac{1}{n_j} \right., \quad (7)$$

а с учетом соотношения (7) выражения (2) и (3) примут следующий вид:

$$\Delta k_N = \Delta k \left/ \sum_{j=1}^{N_{nc}} \frac{1}{n_j} \right.; \quad (8)$$

$$\delta k_N = \frac{\Delta k_N}{k_N} = \frac{\Delta k}{k} = N \frac{1}{N} \delta k. \quad (9)$$

Очевидно, что имеет место соотношение

$$N = \sum_{j=1}^{N_{nc}} n_j. \quad (10)$$

Таким образом, и в этом случае справедлива формула (4).

Тот факт, что коэффициенты влияния СИТ АРТС резервированной группы не зависят от типа соединения СИТ АРТС, показывает, что структурно-функциональное резервирование может быть осуществлено различными способами. Поскольку на метрологическую надёжность не влияет тип соединения СИТ АРТС в резервированной группе, то порядок соединения СИТ АРТС может выбираться из других соображений (например, исходя из предпочтительных номинальных значений СИТ АРТС, мощности потребляемого тока, массы, габаритных размеров и т.д.).

Рассмотрим частный случай структурно-функционального резервирования N_{om} однотипными СИТ АРТС.

При взаимной независимости процессов дрейфа метрологических характеристик метрологически резервированной группы СИТ АРТС будут справедливыми следующие положения: во-первых, при увеличении кратности резервирования интенсивность дрейфа метрологических характеристик СИТ АРТС стремится к линейной форме, соответствующей нормальному закону распределения нестабильности метрологических характеристик СИТ АРТС. Во-вторых, структурно-функциональное резервирование не изменяет основные параметры дрейфа метрологически резервированной группы СИТ АРТС.

Эффект структурно-функционального резервирования обусловлен снижением разброса текущих скоростей дрейфа параметров СИТ АРТС.

При применении структурно-функционального резервирования следует учитывать возможность корреляции процессов дрейфа элементов. Например, если для резервирования применяются элементы одного типа, одинакового возраста, изготовленные на одном предприятии, то вполне вероятна корреляционная зависимость скоростей дрейфа их параметров. Такая зависимость существенно снижает эффективность резервирования.

Действительно, дисперсия нестабильности резервированной группы из N_{om} одинаковых элементов равна:

$$\sigma_{N_{om}}^2(t) = \sigma^2(t) \left[r(t) + \frac{1-r(t)}{N_{om}} \right], \quad (11)$$

где $r(t)$ – коэффициент корреляции нестабильностей метрологически резервированной группы СИТ АРТС за время t ; $\sigma(t)$ – дисперсия нестабильности одного СИТ АРТС из состава метрологически резервированной группы СИТ АРТС.

Формула (11) показывает, что при любой сколь угодно большой кратности резервирования среднее

квадратическое отклонение (СКО) нестабильности метрологически резервированной группы СИТ АРТС не может быть меньше величины $\sigma(t)\sqrt{r(t)}$.

Например, при $r(t) = 0,25$ СКО нестабильности метрологически резервированной группы СИТ АРТС нельзя уменьшить за счет резервирования более чем в 2 раза, а при $r(t) = 0,5$ – не более чем в 1,5 раза, а при $r(t) = 0,8$ – только на 10 %. Это обстоятельство вызывает сомнения в целесообразности существующей практики создания групповых эталонов из большого числа (20 и более) одинаковых мер.

Пусть, например, групповой эталон состоит из 20 мер. При этом считается, что СКО нестабильности этого эталона составит

$$\sigma_{20}(t) = \frac{\sigma(t)}{\sqrt{20}} \approx 0,22 \sigma(t). \quad (12)$$

Предположим, что коэффициент корреляции равен всего лишь 0,1, такая корреляция практически незаметна на общем фоне процесса. Но и в этом случае минимальное СКО нестабильности, которое можно достичь резервированием, составит $0,316 \sigma(t)$.

При $N_{om} = 20$ СКО нестабильности будет равна $0,38 \sigma(t)$. Если же сократить в 2 раза число мер эталона, то

$$\sigma_{10}(t) = \frac{\sigma(t)}{\sqrt{10}} \approx 0,43 \sigma(t), \quad (13)$$

то есть почти столько же, сколько и при $N_{om} = 20$.

Очевидно, что чем слабее корреляционная связь между траекториями дрейфа параметров элементов, тем меньше СКО нестабильности параметра резервированной группы и точнее прогноз его значений. Поэтому следует всегда стремиться к уменьшению коэффициента корреляции. Для этого необходимо комплектовать метрологический резерв средств измерительной техники АРТС разного типа. Если это невозможно, то подбирать в него СИТ АРТС из разных партий поставки.

Выводы

Таким образом, в статье рассмотрен подход к повышению метрологической надёжности СИТ АРТС, основанный на структурно-функциональном резервировании. Исследованы особенности и предложены пути его реализации, а также проанализированы отличия структурно-функционального резервирования от обычного резервирования, широко используемого в классической теории надёжности.

Литература

1. Яковлев М.Ю. Підвищення метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки авіаційних радіотехнічних систем // Системи управління, навігації та зв'язку – К.: ЦНДІ навігації і управління, 2007. – Вип. 3. – С. 124-129.
2. Яцук В.О. Підвищення метрологічної надійності засобів вимірювань у робочих умовах експлуатації // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2002. – № 60. – С. 98-102.
3. Бойко О.В., Столярчук П.Г., Яцук В.О., Крохмальний Б.І. Підвищення метрологічної надійності вимірювальних каналів енергетичних об'єктів // Вісник Національного ун-ту “Львівська політехніка”. “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. – 2003. – № 487. – С. 33-36.
4. Рыбин М. А. Разработка методики оптимизации процессов обеспечения метрологической надежности средств технического диагностирования автомобилей: Дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10. – Владимир, 2000. – 245 с.
5. Гаскаров Д.В., Галинкевич Т.А., Мозгалевский А.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М: Сов. радио, 1974. – 223 с.

Поступила в редакцию 11.03.2008

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