

© 2020 г. В.Н. БУКОВ, д-р техн. наук (v_bukov@mail.ru)
(ОАО “Бортовые аэронавигационные системы”, Москва),
Е.В. ОЗЕРОВ, канд. техн. наук (ozerovevg@yandex.ru)
(ВУНЦ ВВС “Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина”, Воронеж),
В.А. ШУРМАН (shurman@niiao.ru)
(Филиал АО “Раменское приборостроительное КБ”, Жуковский)

ЛОГИЧЕСКИЙ ПАРНЫЙ МОНИТОРИНГ С УЧЕТОМ СЕРОЙ ЗОНЫ

Развивается подход логического парного мониторинга функциональных узлов различной природы с одновременным контролем как основной (функциональной), так и контролирующей (мониторинговой) частей системы. Вводится определение серой зоны парного мониторинга, обусловленной ограниченными возможностями необходимого для мониторинга разделения частей функционального узла, реализующих его предназначение и осуществляющих встроенный контроль исправности. Исследуются проявления указанных ограничений и предлагается методика практического использования логического парного мониторинга с учетом их наличия. Приводится методический пример.

Ключевые слова: комплекс оборудования, функциональный модуль, мониторинговый модуль, функциональный узел, индикаторная матрица, логический парный мониторинг, серая зона логического парного мониторинга.

DOI: 10.31857/S0005231020060062

1. Введение

Встроенные средства контроля (ВСК) [1, 2] относятся к наиболее распространенным современным решениям обеспечения требуемого уровня отказобезопасности различных технических систем. В системах же повышенной опасности, к которым, в частности, относятся авиационные комплексы бортового оборудования (КБО), встроенный контроль внедряется во все составляющие компоненты (системы, подсистемы, узлы, модули и даже микросхемы).

Другим важным обстоятельством является то, что по разным причинам комплексы, сопряженные с повышенной опасностью, почти всегда избыточны в аппаратном, функциональном и других аспектах. Это позволяет использовать сравнительный анализ функционирования физически однородных (одинаковых) и разнородных (различных по физической природе или техническому устройству) компонентов для выявления фактов наличия и мест неисправностей в реальном времени и в рабочем режиме системы [3–5].

Для мониторинга технического состояния используется широкий спектр подходов и алгоритмов [6–9].

Так, в [10, 11] предлагается общий подход к решению задачи мониторинга, основанный на модели оценки работоспособности бортового оборудования с

проверкой принадлежности команд к допустимым, с соответствующей логикой управления и выдачей сообщений об ошибке. Работа [12] содержит описание задач, выполняемых встроенной системой контроля, которая входит в состав бортового комплекса управления космического аппарата. Эти и другие аналогичные публикации нацелены на оценку надежности технических систем и/или обоснование алгоритмов их диагностирования (с учетом или без учета возможности восстановления [13]). При этом общим недостатком описанных подходов является вынужденное доверие создаваемым средствам диагностирования (априорное предположение об их непогрешимости).

В развитие технологии создания и применения ВСК в [14] разработан подход, названный логическим парным мониторингом (ЛПМ), в котором предлагается организация одновременного (квазисовременного) оценивания правильности функционирования как объектов, подлежащих контролю, так и самих средств мониторинга (самоконтроля) с опорой на уже известные решения и алгоритмы, изложенные в доступных источниках по диагностике. При этом не накладывается ограничений на тип обнаруживаемых отказов (аппаратные, программные).

Вместе с тем эффективность (успешность) ЛПМ тесно связана с практическим (в виде конкретных аппаратных и/или программных решений) разделением технического устройства на части, выполняющие функциональную нагрузку, и части, осуществляющие встроенный контроль. Недостаточная строгость соответствующей границы при реализации подхода порождает неоднозначность результатов контроля, снижая его практическую полезность.

В [14] это обстоятельство не учитывалось, в то время как настоящая статья развивает указанный подход, содержит количественное описание функционально-конструктивного перекрытия функциональной и мониторинговой частей контролируемого компонента, а также предлагает способ преодоления отмеченного выше затруднения.

2. Логический парный мониторинг

Базой ЛПМ является совокупность сопоставимых в смысле диагностирования функциональных узлов (ФУз), каждый из которых содержит функциональный модуль (ФМ), выполняющий функции узла по назначению, и мониторинговый модуль (ММ), предназначенный для диагностирования в реальном времени (мониторинга) технического состояния ФМ. Состав, структура и алгоритмы ММ могут быть различными и зависят от особенностей области техники, подходов и методов, использованных при его создании, а также целей и возможностей разработчика.

Суть ЛПМ заключается в том [14], что для двух контролируемых ФУз одного функционального назначения (с идентичными принципами работы и интерфейсами функциональной и мониторинговой частей), на входы которых подаются данные в общем случае от независимых источников (датчиков), рассматривается сочетание автономного (в пределах одного ФУз) и взаимно-перекрестного (между разными ФУз) мониторинга. По результатам мониторинга формируется значение индикаторной матрицы (ИМ), используемое для определения наличия и места (с точностью до модуля) одной или

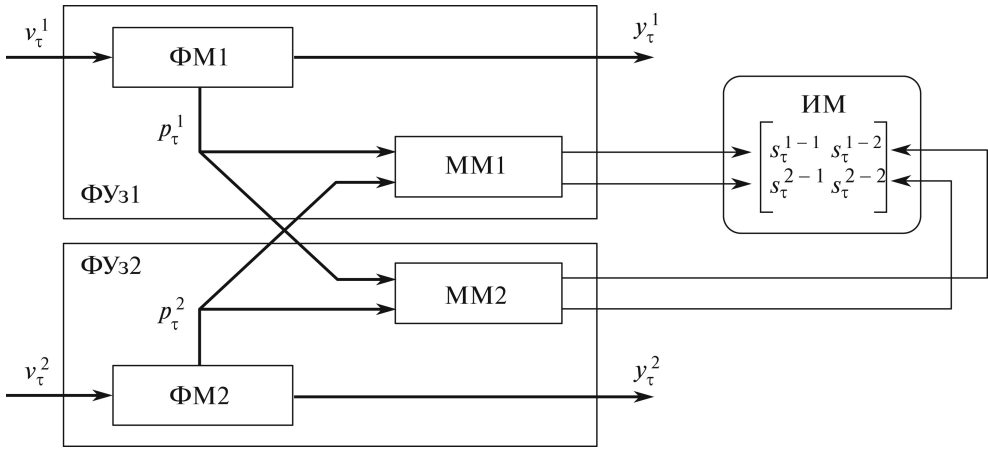


Рис. 1. Схема ЛПМ функциональных узлов.

одновременно двух неисправностей в паре ФУЗ. Изложенное иллюстрирует рис. 1, где использованы обозначения: τ – текущее время (номер цикла мониторинга), v_τ – входные данные, y_τ – выходные данные, p_τ – контролируемые параметры (которые могут включать v_τ и y_τ), s_τ – оценка технического состояния ФМ.

Физическая природа, форма представления и процессы обработки данных могут быть разнообразными. Существенно то, что в силу односторонности связей процесс $v_\tau^1 \rightarrow y_\tau^1$ не может повлиять на процесс $v_\tau^2 \rightarrow y_\tau^2$ и наоборот. В то же время процессы и результаты обработки параметров p_τ в мониторинговых модулях не влияют на процессы $v_\tau^1 \rightarrow y_\tau^1$ и $v_\tau^2 \rightarrow y_\tau^2$ в функциональных модулях.

При этом мониторинг осуществляется в условиях типовых предположений:

А. Потoki одготипных данных через различные ФМ не связаны между собой (функциональная автономность ФМ);

Б. Каждый функциональный узел ФМ+ММ выполнен на технологической базе и поддерживается инфраструктурными средствами, не зависящими от базы и средств других ФУЗ (техническая разнородность ФУЗ);

В. ФМ и ММ устроены таким образом, что совместимы для образования различных ФУЗ независимо от технологических и инфраструктурных особенностей (интерфейсная однородность ФУЗ);

Г. Процесс мониторинга разбит на циклы, внутри которых технические состояния ФМ и ММ неизменны (стационарность неисправностей ФУЗ).

Бинарные оценки s_τ^{i-j} , определенным образом размещенные в ИМ размеров 2×2 :

$$S_\tau^{\text{инд}} = \begin{bmatrix} s_\tau^{1-1} & s_\tau^{1-2} \\ s_\tau^{2-1} & s_\tau^{2-2} \end{bmatrix},$$

сформированы каждым (j -м) ММ в τ -м цикле мониторинга и по определению характеризуют исправность “1” или неисправность “0” каждого (i -го) ФМ.

Показано в [14], что при справедливости предположения Б полная группа различных значений ИМ составляет 13 матриц, однозначно связанных с исправным, работоспособным (при отказе ММ), а также неисправным состоянием обоих ФУз. Причем, в соответствии с индикаторным правилом ЛПМ [14], каждое значение ИМ с уникальной структурой однозначно определяет техническое состояние как каждого ФМ, так и каждого ММ. Исключение составляет значение ИМ

$$(1) \quad S_{\tau}^{\text{инд}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

которому может соответствовать исправность обоих ФУз или неисправность одного из ММ в виде выдачи ложного значения оценки “исправен”. Но эта неоднозначность не касается утверждения об исправности ФМ, а в части ММ может быть учтена конструктивными решениями¹.

3. Понятие и описание серой зоны ЛПМ

Среди всевозможных схем конструктивного исполнения ФМ и ММ выделим иллюстрируемый на рис. 2 вариант как наиболее характерный. Здесь ММ представлен двумя последовательно соединенными частями: серой зоной (СЗ) и аналитическим сегментом (АС).

СЗ, будучи функциональной частью ММ, из-за конструктивных особенностей не может быть отделена от ФМ (в смысле переключения потоков данных между разными ФМ и ММ для реализации ЛПМ) по концептуальной границе. Но разделение возможно по другой, практически реализуемой границе. Именно такая ситуация названа наличием серой зоны, а ЛПМ – соответственно ЛПМс с учетом серой зоны, кратко ЛПМс.

Будем полагать, что технические состояния модуля ФМ, серой зоны СЗ и аналитического сегмента АС, рассматриваемых в ЛПМс, независимы друг от друга и соответствуют следующим моделям:

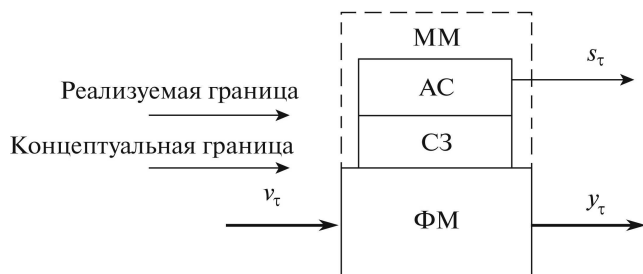


Рис. 2. Пояснение понятия «серой зоны» ЛПМ, связанной с переносом границы разделения ФУз.

¹ См. раздел 7.

а) ФМ, осуществляющий преобразование многомерного входного потока v_τ в многомерный выходной поток y_τ , может быть исправным – “1”, если выполняет заданные функции надлежащим образом, и неисправным – “0” в противном случае; при этом неисправное состояние ФМ по определению должно обнаруживаться посредством исправного ММ, состоящего из СЗ и АС;

б) СЗ, передающая из ФМ в АС и частично обрабатывающая многомерный вектор параметров p_τ , может быть исправной – “1”, если не вносит искажения в p_τ или вносимые ею искажения не влияют на качество выполнения требуемой функции и адекватность оценок технического состояния ФМ, формируемых АС, и неисправной – “0”, если вносимые ею в p_τ искажения приводят к инверсии оценок исправно работающего АС (на выходе “0” вместо “1” или “1” вместо “0”);

в) АС, формирующий оценку технического состояния ФМ по вектору параметров p_τ , может быть исправным – “1”, если сформированная оценка адекватна получаемым параметрам, и неисправным – “0₁”, если ложная, не зависящая от получаемых параметров оценка исправности ФМ на выходе АС принимает значение “1”, или неисправным – “0₀”, если – “0”.

Существует объективная сложность точного (идеального) проведения в некоторых реальных технических устройствах границы между оборудованием встроенного контроля и основным оборудованием. Оптимальная или приемлемая (рациональная) мера такого разделения в каждом конкретном проекте определяется разработчиком. Предлагаемый подход дает разработчику возможность оценить эффективность (результативность) мониторинга в разных вариантах проведения такой границы.

4. Индикаторное правило ЛПМ с учетом серой зоны

Предлагаемые модели технического состояния не противоречат принятым ранее в [14], а лишь развивают их с учетом разделения ММ на СЗ и АС.

При наличии серой зоны схема ЛПМ принимает вид, показанный на рис. 3.

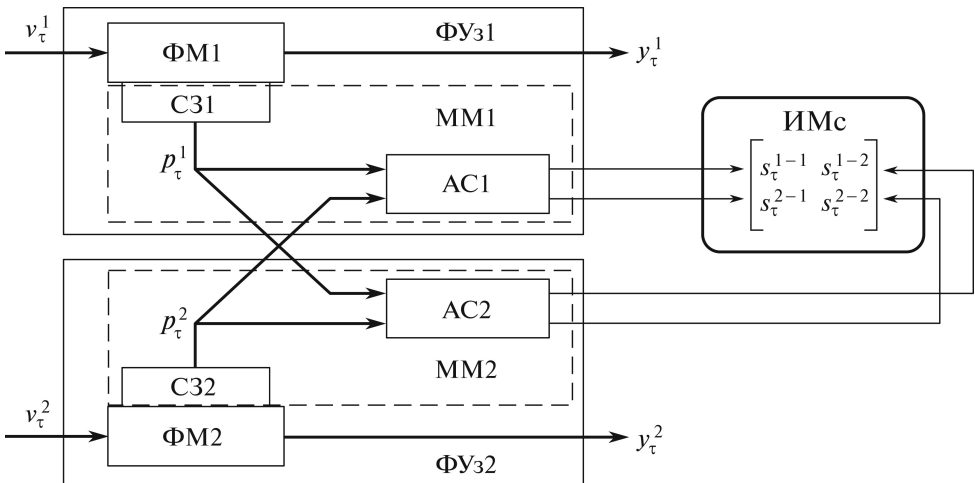


Рис. 3. Схема ЛПМс функциональных узлов.

Таблица 1. Индикаторные матрицы $S_{\tau}^{\text{инд.с}}$ при ЛПМс

Неисправность одного из ФМ* ¹ и/или одной из СЗ* ²	Неисправность одного из АС* ³				
	АС1		АС2		отсутствует
	ложная "1"	ложный "0"	ложная "1"	ложный "0"	
ФМ1 или СЗ1	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
ФМ2 или СЗ2	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
ФМ1+СЗ2 или ФМ2+СЗ1	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}^{*6}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^{*7}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{*5}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^{*7}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^{*7}$
ФМ1+СЗ1 или ФМ2+СЗ2 или отсутствует	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{*4}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{*5}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{*4}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}^{*6}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{*4}$

*1 ненадлежащее выполнение возложенных функций, которое должно обнаружиться посредством СЗ+АС,

*2 искажение данных, приводящее к инверсии результатов исправных АС,

*3 ложная выдача "исправен" или "неисправен",

*4 неоднозначно: все исправно или возможна неисправность АС1₁ или АС2₁ вместе или без неисправностей в паре ФМ1+СЗ1 или ФМ2+СЗ2,

*5 неоднозначно: возможна неисправность только АС1₀ или в сочетании с одной из пар ФМ1+СЗ1 или ФМ2+СЗ2 или же только АС2₁ в сочетании с одной из пар ФМ1+СЗ2 или ФМ2+СЗ1,

*6 неоднозначно: возможна неисправность только АС2₀ или в сочетании с одной из пар ФМ1+СЗ2 или ФМ2+СЗ1 или же только АС1₁ в сочетании с одной из пар ФМ1+СЗ2 или ФМ2+СЗ1,

*7 неоднозначно: возможно сочетание неисправностей самих ФМ1+СЗ2 или ФМ2+СЗ1 или же еще и в сочетании с неисправностью АС1₀ или АС2₀.

И хотя индикаторная матрица с учетом серой зоны (ИМс) по размерам и обозначениям аналогична ИМ, ее содержание и интерпретация отличаются.

Объемы и структура передачи данных на рис. 3 аналогичны рис. 1, но увеличено число частей (до 6) и количество возможных комбинаций их исправных и неисправных состояний соответственно. С учетом предположений Б и В общее количество различных комбинаций технических состояний ФМ, СЗ и АС для пары ФУз при ЛПМс равно 45 (это множество комбинаций охватывает исправное состояние ФУз, а также одну, две и три неисправности различных его частей). В их число входят 15 комбинаций² с исправными СЗ, которые совпадают с комбинациями ЛПМ [14].

Совокупность различных значений ИМс увеличилась с 13 (для ЛПМ) до 14, пополнившись матрицей с нулевыми элементами. По аналогии с [14] все уникальные значения ИМс размещены в табл. 1.

Уникальные значения ИМс своим размещением в табл. 1 указывают (индикаторное правило) на соответствующие комбинации технических состояний

² Всего 13 различных ИМ, но одна из них (1) соответствует трем комбинациям технических состояний ФМ и ММ.

модулей. Строки табл. 1, не содержащие в левом столбце набранные жирным шрифтом СЗ1 и СЗ2, идентичны строкам аналогичной таблицы в [14]. Кроме того, здесь строки, отмеченные в левом столбце суммой модулей, относятся к соответствующей комбинации одновременных неисправностей. Строки в левом столбце, не разделенные границей, представляют альтернативные варианты комбинаций неисправностей. Помимо этого, значения ИМс с неоднозначным толкованием комбинаций неисправностей занимают несколько ячеек и помечены верхними индексами от *4 до *7.

Используется табл. 1 следующим образом. По значению сформированной ИМс определяется занимаемая ею ячейка (или группа ячеек). Наименования строк и столбцов этой ячейки несут информацию об исправности, одной неисправности или комбинации неисправностей различных частей ФУз.

Так, значение ИМс

$$(2) \quad S_{\tau}^{\text{инд.с}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

указывает на то, что в паре ФУз имеет место комбинация одновременных неисправностей в ФМ1+АС1₁ или в СЗ1+АС1₁.

Значению ИМс

$$(3) \quad S_{\tau}^{\text{нид.с}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

соответствует один из вариантов:

неисправность только АС1₀,

комбинация трех одновременных неисправностей: или АС1₀+ФМ1+СЗ1, или АС1₀+ФМ2+СЗ2, или ФМ1+СЗ2+АС2₁, или ФМ2+СЗ1+АС2₁.

Если же ИМс содержит только нулевые элементы, то это соответствует наличию одновременных неисправностей в паре модулей ФМ1+СЗ2 или в паре модулей ФМ2+СЗ1.

Как и ИМ в [14], ИМс со значением

$$(4) \quad S_{\tau}^{\text{инд.с}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

указывает на полную исправность обоих ФУз или на наличие неисправности в одном из сегментов АС1₁ или АС2₁, а также на то, что вместо указанных состояний могут иметь место одновременные неисправности в парах ФМ1+СЗ1 или ФМ2+СЗ2. Здесь неисправность любой из СЗ явным образом маскирует (скрывает) неисправность “своего” ФМ.

Если решаемую задачу сузить до подтверждения только исправного состояния ФМ, то получение такого подтверждения в виде ИМс (4) обременяется альтернативами в виде одновременной неисправности ФМ1+СЗ1 или ФМ2+СЗ2. Как и в [14], возможность неисправности АС1₁ или АС2₁ не отражается на оценке состояния ФМ.

Из анализа следует, что серая зона ЛПМ вносит существенную неоднозначность в детерминированное определение места неисправности.

5. Вероятностный ЛПМ с учетом серой зоны

Ситуация с учетом вероятностей обнаружения неисправностей и ошибок 1-го (ложная тревога) и 2-го (пропуск неисправности) рода в используемых ВСК рассмотрена в [14], в настоящей же статье анализируется вероятностный аспект, обусловленный только описанным разделением ММ на СЗ и АС.

Задача формулируется так. Значение ИМс, полученное при ЛПМс, считается свершившимся фактом. Требуется указать вероятности соответствующих этому факту технических состояний частей ФУз или комбинаций их технических состояний при известной доле “содержания” ММ, отнесенной к СЗ, т.е. если известна или задана относительная (отнесенная к некоторым образом определенной условной сложности ММ) условная сложность СЗ.

При этом в первом приближении предположения Б и В раздела 2 считаются выполняемыми точно, без вероятностного контекста.

Для получения количественных оценок, связанных с разделением ММ на СЗ и АС, будем считать, что ММ реализован в виде вычислительной системы, для которой уместен показатель условной сложности в виде произведения числа полупроводниковых переходов (или ячеек памяти) в аппаратном обеспечении на число команд программного обеспечения. Тогда относительную сложность СЗ в составе ММ можно охарактеризовать параметром:

$$\lambda = \frac{\text{условная сложность СЗ}}{\text{условная сложность ММ}} = \\ = \frac{(\text{число переходов СЗ}) \cdot (\text{число команд СЗ})}{(\text{число переходов ММ}) \cdot (\text{число команд ММ})}.$$

Условная сложность в каждом конкретном случае может и должна быть если не точно рассчитана, то оценена. Мультипликативный показатель сложности предлагается в виде примера и, в принципе, может быть усовершенствован (и вообще заменен на иной при другой технической реализации ММ).

В соответствии с [14] будем полагать, что в ММ могут возникать два вида простых неисправностей (“константные отказы”: ложная оценка “1” или ложная оценка “0” на выходе) и один вид сложной неисправности (инверсия оценки на выходе с “1” на “0” и наоборот), распределенных равномерно по указанной условной сложности ММ с вероятностями соответственно Q_1 , Q_0 и $Q_{\text{инв}}$ (на единицу сложности) при условии $Q_1 + Q_0 \leq 1$. Если первые две неисправности очевидным образом несовместны (не могут быть одновременно ложные “1” и “0”), то третью будем считать несовместной с первыми двумя в силу доминирования неисправностей АС₁ и АС₀ над неисправностью СЗ (в том смысле, что неисправность СЗ может проявиться только при отсутствии неисправностей АС₁ и АС₀).

Полагая³, что при разделении ММ на СЗ и АС природа первых двух неисправностей ММ полностью наследуется в АС, а последней – в СЗ, и, подсчитывая показатель λ относительной сложности СЗ, для конкретной реализа-

³ Это предположение обусловлено отсутствием достаточно простой альтернативы. В дальнейшем, очевидно, потребуется более тщательное исследование.

ции ММ, можно оценить вероятности указанных неисправностей АС₁, АС₀ и СЗ по формулам:

$$(5) \quad \begin{aligned} Q_{АС(1)} &= (1 - \lambda)Q_1, \\ Q_{АС(0)} &= (1 - \lambda)Q_0, \\ Q_{СЗ} &= \lambda Q_{инв} \underbrace{(1 - Q_1 - Q_0)}_{\text{Вероятность исправности АС}}. \end{aligned}$$

Теперь, вводя вероятности $Q_{ФМ}$ ненадлежащего выполнения функций в каждом из ФМ, которое по определению должно обнаруживаться посредством ВСК (СЗ+АС), можно использовать табл. 1 индикаторных матриц ЛПМс для вычисления вероятности той или иной комбинации неисправностей.

6. Использование вероятностного ЛПМс

Поскольку ячейки со значениями ИМс соответствуют одновременному наличию независимых неисправностей, указанных в наименованиях строк (первый столбец) и столбцов (третья строка шапки), то для каждого конкретного значения ИМс вероятность событий в виде наличия комбинаций неисправностей определяется произведением соответствующих вероятностей в первом столбце и в третьей строке шапки табл. 1.

Комбинации неисправностей первого столбца табл. 1, соединенные союзом “или”, а также строки и столбцы повторяющихся значений ИМс следует считать альтернативными вариантами комбинаций неисправностей, соответствующих данному значению ИМс.

Так, например, ИМс (3) указывает на альтернативы в виде комбинаций неисправностей: ФМ1+СЗ2+АС2₁, ФМ2+СЗ1+АС2₁, ФМ1+СЗ1+АС1₀, ФМ2+СЗ2+АС1₀ или неисправности только АС1₀.

Рассмотрим значение ИМс (2), получаемое в результате реализации парного мониторинга. В табл. 1 оно находится в единственной ячейке в левом верхнем углу.

Согласно (5) и табл. 1 значению (2) соответствует одна из двух комбинаций неисправностей:

- 1) ФМ1+АС1₁ с ненормированной вероятностью

$$Q_{ФМ1}Q_{АС1(1)} = (1 - \lambda) Q_{ФМ1}Q_1;$$

- 2) СЗ1+АС1₁ с ненормированной вероятностью

$$Q_{СЗ1}Q_{АС1(1)} = \lambda (1 - \lambda) Q_{инв} (Q_1 - Q_1^2 - Q_1Q_0).$$

Поскольку указанные события представляют собой полную группу (только они соответствуют рассматриваемому значению ИМс) несовместных со-

бытий, то в результате нормирования получаем:

$$(6) \quad \begin{aligned} Q_{\text{ФМ1}+\text{АС1}(1)} &= \frac{Q_{\text{ФМ1}}}{Q_{\text{ФМ1}} + \lambda Q_{\text{инв}} (1 - Q_1 - Q_0)}, \\ Q_{\text{СЗ1}+\text{АС1}(1)} &= \frac{\lambda Q_{\text{инв}} (1 - Q_1 - Q_0)}{Q_{\text{ФМ1}} + \lambda Q_{\text{инв}} (1 - Q_1 - Q_0)}. \end{aligned}$$

Непосредственно из формул (6) видно, что при уменьшении показателя относительной сложности СЗ, т.е. при $\lambda \rightarrow 0$, вероятность того, что при ИМс (2) неисправны одновременно ФМ1+АС1₁, стремится к единице, а СЗ1+АС1₁ – к нулю. К этому же результату приводит увеличение вероятностей “константных” неисправностей АС1₁ и АС1₀, когда $Q_1 + Q_0 \rightarrow 1$.

В другой крайней ситуации, когда $Q_1 + Q_0 \rightarrow 0$, соответствующие вероятности принимают значения

$$\begin{aligned} Q_{\text{ФМ}+\text{АС1}(1)} &= \frac{Q_{\text{ФМ1}}}{Q_{\text{ФМ1}} + \lambda Q_{\text{инв}}}, \\ Q_{\text{СЗ1}+\text{АС1}(1)} &= \frac{\lambda Q_{\text{инв}}}{Q_{\text{ФМ1}} + \lambda Q_{\text{инв}}}, \end{aligned}$$

из которых вытекают очевидные утверждения:

при $Q_{\text{инв}} \rightarrow 0$ имеют место одновременные неисправности пары ФМ1+АС1₁ (возвращение соответствующего детерминированного случая, рассмотренного в [14]);

при $Q_{\text{ФМ1}} \rightarrow 0$ имеют место одновременные неисправности пары СЗ1+АС1₁ (возникновение детерминированного случая, отсутствующего в [14], здесь АС1 дает ложную “1” обоим ФМ независимо от их исправности, а неисправность СЗ1 вызывает инверсию выхода исправного АС2 при оценивании исправности обоих ФМ).

Формулам (6) соответствует также утверждение о том, что по отношению к суждению об исправности ФМ1 вероятности ошибок 1-го (ложная тревога) и 2-го (пропуск неисправности) рода равны между собой и определяются формулой

$$\begin{aligned} P_{\text{обн ФМ}}|_1 &= P_{\text{обн ФМ}}|_2 = Q_{\text{ФМ1}+\text{АС1}(1)} Q_{\text{СЗ1}+\text{АС1}(1)} = \\ &= \frac{\lambda Q_{\text{ФМ1}} Q_{\text{инв}} (1 - Q_1 - Q_0)}{(Q_{\text{ФМ1}} + \lambda Q_{\text{инв}} (1 - Q_1 - Q_0))^2}. \end{aligned}$$

Как и следовало ожидать, уменьшение показателя относительной сложности СЗ ($\lambda \rightarrow 0$) приводит к обнулению ошибок диагностирования неисправности ФМ1, т.е. возвращает к детерминированной задаче, описанной в [14].

Формулы (6) можно использовать иначе. Если на основе каких-либо соображений изначально заданы вероятности $Q_{\text{ФМ1}}$, $Q_{\text{ФМ1+АС1(1)}}$, $Q_{\text{СЗ+АС1(1)}}$, Q_1 , Q_0 и $Q_{\text{инв}}$ неправильного функционирования ФУЗ1, то по формуле

$$\lambda_{\text{доп}} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{Q_{\text{ФМ1}}(1 - Q_{\text{ФМ1+АС1(1)}})}{Q_{\text{инв}} Q_{\text{ФМ1+АС1(1)}} (1 - Q_1 - Q_0)}, \\ \frac{Q_{\text{ФМ1}} Q_{\text{СЗ+АС1(1)}}}{Q_{\text{инв}} (1 - Q_{\text{СЗ+АС1(1)}}) (1 - Q_1 - Q_0)} \end{array} \right.$$

можно оценить допустимое значение относительной условной сложности серой зоны этого узла ($\lambda \leq \lambda_{\text{доп}}$). Для более тщательного обоснования требований к серой зоне нужны специальные исследования, но это выходит за рамки данной статьи.

7. Устранение неоднозначности мониторинга

Вернемся к детерминистской постановке задачи и дополним принятые в разделе 2 предположения еще одной позицией.

Д. При каждом переходе от предыдущего к последующему циклу мониторинга в любом функциональном узле может возникнуть только одна⁴ неисправность (простота отказов ФУЗ).

Тогда из табл. 1 значений индикаторной матрицы с учетом серых зон исключаются все сочетания различных неисправностей, и табл. 1 принимает вид табл. 2.

Таблица 2. Индикаторные матрицы $S_{\tau}^{\text{инд.с}}$ при ЛПМС с предположением Д

Неисправность одного из ФМ* ¹ или одной из СЗ* ²	Неисправность одного из АС* ³				
	АС1		АС2		отсутствует
	ложная "1"	ложный "0"	ложная "1"	ложный "0"	
ФМ1 или СЗ1	–	–	–	–	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
ФМ2 или СЗ2	–	–	–	–	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
отсутствует	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{*4}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{*4}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{*4}$

*¹ ненадлежащее выполнение возложенных функций, которое должно обнаружиться посредством СЗ+АС,

*² искажение данных, приводящее к инверсии результатов исправных АС,

*³ ложная выдача "исправен" или "неисправен",

*⁴ неоднозначно: все исправно или возможна неисправность АС1₁ или АС2₁.

⁴ Считается, что инфраструктурные неисправности типа прерывание питания или отсутствие связи с другими компонентами обнаруживаются независимыми средствами.

Таблица 2 содержит три случая неоднозначностей для полученного значения ИМС:

- а) в первой строке соответствует неисправности либо ФМ1, либо СЗ1;
- б) во второй строке соответствует неисправности либо ФМ2, либо СЗ2;
- в) в третьей строке соответствует исправному состоянию пары ФУз или неисправности либо АС1₁, либо АС2₁.

Если условиями создания и использования средств мониторинга допускаются, пусть в ограниченных объемах, элементы тест-контроля, то результативность мониторинга (теперь диагностирования) можно увеличить, внося определенные изменения в систему.

В [14] описан способ снятия неоднозначности случая в, который заключается в использовании теста: следует искусственно ввести неисправность в один из ФМ, отключив его от участия в функционировании системы. Тогда в соответствии с табл. 1 обнаруживается неисправность АС1₁ или АС2₁.

Аналогично можно снять неоднозначность случаев а и б.

Пусть неоднозначность относится к ФМ1 и СЗ1 (случай а). Тогда в функциональный модуль ФМ1 следует ввести изменения, делающие его заведомо неисправным. Затем повторить цикл проверки и проанализировать значение получаемой ИМС.

Если соответствующая индикаторная матрица не изменит свое значение, то это свидетельствует о неисправности именно ФМ1. Если же ИМС принимает значение (4), соответствующее согласно табл. 1 наличию одновременных неисправностей в ФМ1 и СЗ1, то это свидетельствует об изначально неисправной СЗ1.

Получение достоверной информации о состоянии каждого из модулей позволяет строить стратегию дальнейшего использования системы в целом:

при неисправности ФМ исключить его (вместе с соответствующей СЗ) из возможного участия в формировании конфигурации комплекса оборудования [15];

при неисправности СЗ и дефиците исправных связок⁵ ФМ+СЗ можно использовать связку, содержащую данную СЗ, с принудительным инвертированием результата мониторинга в случае подтверждения исправности АС, взаимодействующего со связкой;

при неисправности АС исключить его из возможного участия в формировании функционального узла.

8. Пример

Детализируем пример, приведенный в [14] и относящийся к проверке входных данных типовой функции авионики. Укрупненная структура одного из уровней соответствующего модуля проверки входных данных (МПВД) представлена на рис. 4.

Выполняемый контроль (мониторинг) заключается в проверке устойчивости (ПУ) приема кодовых слов, поступающих по каналу связи, и в проверке

⁵ Ранее принято, что связка ФМ+СЗ неразделима в смысле коммутации каналов обмена данными.

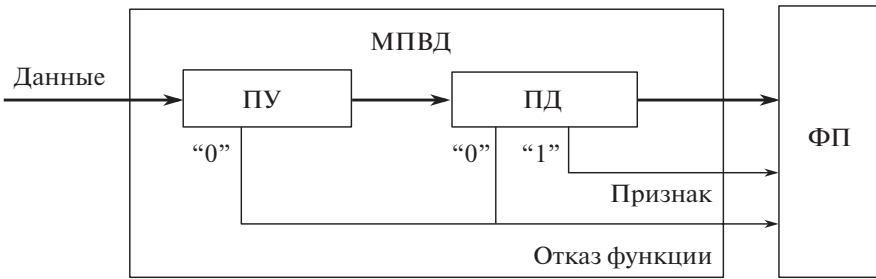


Рис. 4. Один из уровней модуля проверки входных данных.

достоверности (ПД) получаемой информации. В случае успешности данные вместе с признаком их исправности передаются в следующий модуль (функциональное приложение — ФП) для обработки. В противном случае в следующий модуль передается признак отказа функции.

В частности, сужая перечень данных, получаемых вычислителем от системы воздушных сигналов (СВС) до двух параметров: высота абсолютная барометрическая (адрес 203)⁶ и скорость вертикальная (адрес 212), традиционные проверки можно представить упрощенной структурой программы, показанной на рис. 5.

В данном примере ФМ — поток данных с адресами 203 и 212, а ММ — программа входной проверки.

У избыточного КБО может быть несколько систем получения и хранения данных о параметрах полета. Например, в авиации практикуется обособление информационных систем левого и правого бортов (по размещению компонентов на воздушном судне).

Введем обозначения адресов параметров полета: 203_1 и 212_1 — для одной системы (например, левого борта), 203_2 и 212_2 — для другой системы (правого борта).

В этом случае программа ММ с учетом ЛПМ принимает показанный на рис. 6 вид. Здесь серым цветом и штриховыми линиями (стрелками) выделены элементы программы, внесенные в ММ с целью поддержки ЛПМ. Формирование управляющего кода мониторинга здесь не рассматривается, как и последующее использование результатов мониторинга.

Со всей очевидностью серая зона ЛПМс для такой программы определяется элементом “Подключение входа модуля к системе 1 или 2”, определенные части которого неотделимы от каждого из каналов 1 и 2. Будем считать, что каждая из таких частей, связанная со “своим” каналом, включает одну ячейку памяти (для хранения необходимых атрибутов подключаемого канала) и пять машинных команд.

При этом реализация всего модуля требует порядка двух ячеек памяти и 50 машинных команд.

⁶ Адресом (label) называется номер, постоянно закрепленный за соответствующим параметром полета. Адреса всех параметров фиксированы международными нормативными документами серии ARINC.

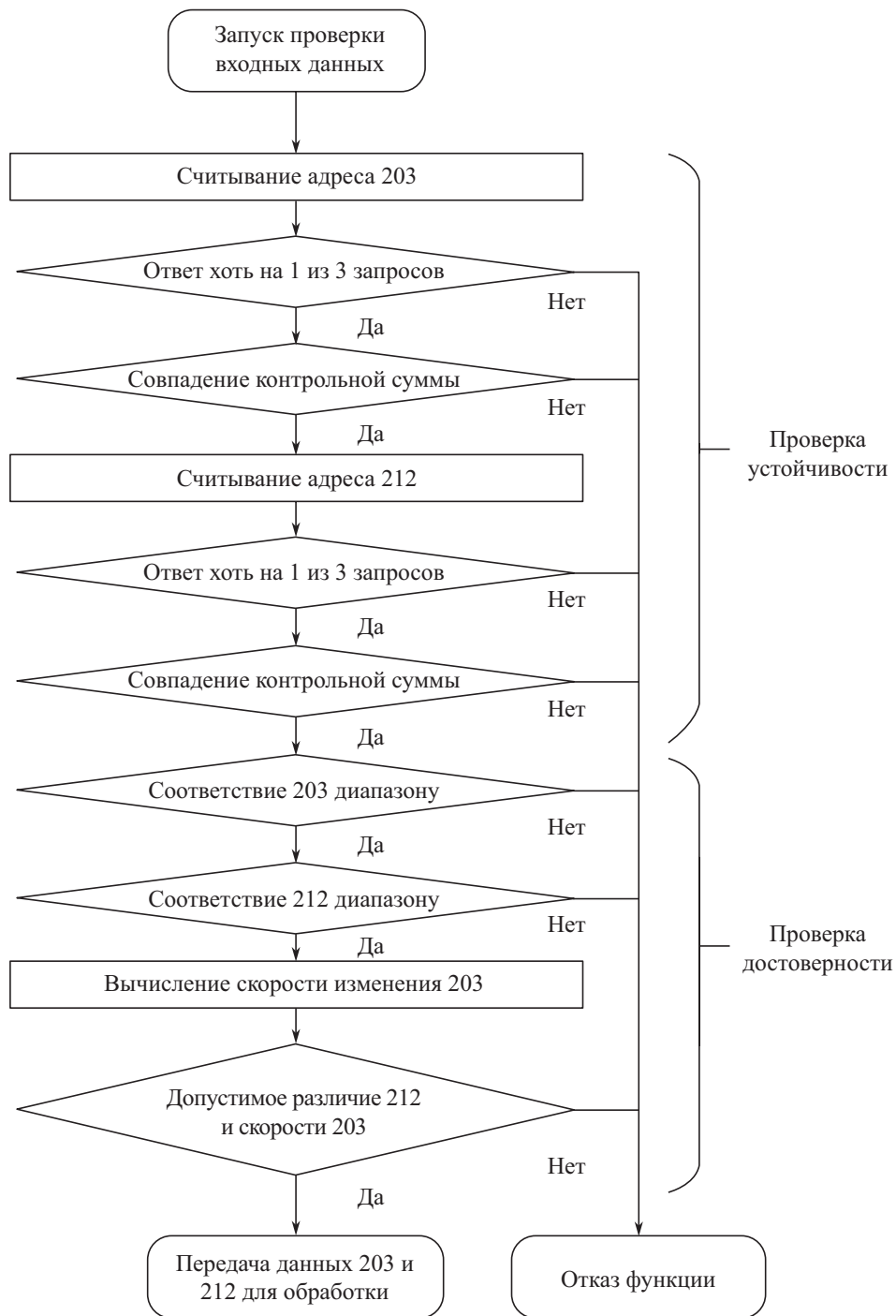


Рис. 5. Упрощенная программа входной проверки.

В результате параметр относительной сложности $CЗ$ в составе ММ принимает значение $\lambda = 0,05$. С увеличением объема входной проверки этот параметр обратно-пропорционально уменьшается.

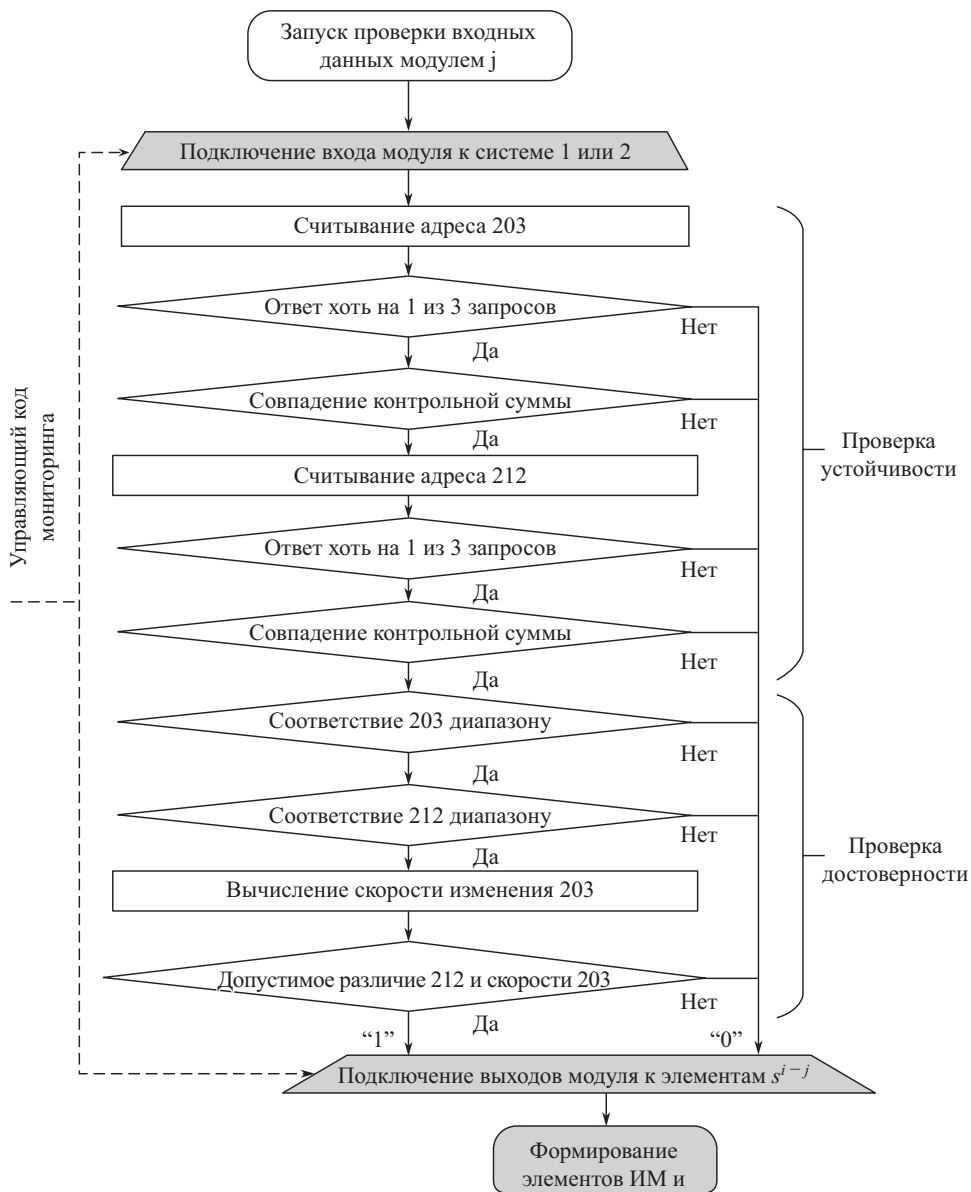


Рис. 6. Структура упрощенной программы ММ, предусматривающей реализацию ЛПМ.

Пусть⁷ в результате ЛПМс для ИМс получено значение (2). Задавшись, в рамках примера, значениями

$$Q_{ФМ1} = 10^{-3}, \quad Q_{инв} = 10^{-2}, \quad Q_1 + Q_0 = 10^{-2},$$

⁷ Числовые значения носят чисто методический характер, обеспечивающий наглядность и доступность для проверки «с карандашом», нежели демонстрацию практически значимых результатов.

получаем в соответствии с формулами (6) вероятности обнаруженных отказов:

$$Q_{\text{ФМ1+АС1(1)}} = \frac{10^{-3}}{10^{-3} + 0,05 \cdot 10^{-2} \cdot (1 - 10^{-2})} = 1 - 5 \cdot 10^{-3},$$

$$Q_{\text{СЗ1+АС1(1)}} = \frac{0,05 \cdot 10^{-2} \cdot (1 - 10^{-2})}{10^{-3} + 0,05 \cdot 10^{-2} \cdot (1 - 10^{-2})} = 5 \cdot 10^{-3}.$$

Таким образом, при получении в результате ЛПМс значения (2) с вероятностью 0,995 имеет место совместный отказ ФМ1 и АС1₁, а с вероятностью 0,005 – совместный отказ СЗ1 и АС1₁. В ЛПМ без серых зон соответствующие вероятности приняли бы значения 1 и 0.

9. Заключение

Практическая реализация ЛПМ может столкнуться с наличием серой зоны, обусловленной невозможностью полноценного разделения функционального узла на составляющие его функциональный и мониторинговый модули. В этом случае уровень неоднозначности результата логического парного мониторинга (теперь ЛПМс) возрастает.

Предложена корректная модель получения результатов мониторинга в режиме одновременного контроля как функциональной, так и мониторинговой частей системы при указанных обстоятельствах. Существенным является то, что мониторинговая часть контролируется только в тех конкретных условиях, в которых работает в данный момент функциональная часть. В этом заключаются принципиальное отличие и преимущество предлагаемого подхода по сравнению с гипотетически возможной альтернативой в виде по необходимости полного тест-контроля мониторинговой части, ресурсоемкого и трудновыполнимого в реальном времени.

Всего подход позволит обнаружить от одной до трех одновременных неисправностей модуля ФМ, серой зоны СЗ и аналитического сегмента АС.

Практическая ценность предлагаемого подхода тесно связана с назревшим изменением взаимодействия функциональных частей технических изделий со встроенными в них средствами контроля. Максимальное сокращение серой зоны потребует не только преодоления технических сложностей, но и перераспределения ответственности разработчиков различных профилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 27.605–2013. Надежность в технике. Ремонтпригодность оборудования. Диагностическая проверка.
2. *Долбня Н.А.* Встроенные средства контроля бортовой вычислительной системы под управлением операционной системы реального времени как итеративный агрегированный объект // Вест. Самарс. гос. аэрокосм. ун-та. 2012. № 5 (36). С. 224–228.
3. *Чернодаров А.В.* Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов. М.: Научтехлитиздат, 2017.

4. *Amato F., Cosentino C., Mattei M., Paviglianiti G.* A Direct/Functional Redundancy Scheme for Fault Detection and Isolation on an Aircraft // *Aerospace Sci. Technol.* 2006. V. 10. No. 4. P. 338–345.
5. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения.
6. *Pouliezos A.D., Stavrakakis G.S.* Real time fault monitoring of industrial processes. The Netherlands: Kluwer Acad. Publishers, 1994.
7. *Bartys M., Patton R.J., Syfert M., Heras S., Quevedo J.* Introduction to the DAMADICS Actuator FDI Benchmark Study // *Control Eng. Pract.* 2006. V. 14. No. 6. P. 577–596. Special Iss. “Fault Diagnosis of Actuator Systems: the DAMADICS Benchmark Problem”.
8. *Blanke M., Kinnaert M., Lunze M., Staroswiecki M.* Diagnosis and fault tolerant control. N.Y.: Springer, 2008.
9. *Patton R.J., Uppal F.J., Simani S., Polle B.* Reliable Fault Diagnosis Scheme for a Spacecraft Attitude Control System // *J. Risk Reliabilit.* 2008. V. 222. No. 2. P. 139–152.
10. *Мозгалеvский А.В., Калявин В.П.* Системы диагностирования судового оборудования. Уч. пос. Л.: Судостроение, 1987.
11. *Соколов Н.Л.* Основные принципы диагностики работоспособности бортовой аппаратуры автоматических КА и выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций // *Успехи современного естествознания.* 2007. № 6. С. 16–20.
12. *Барановский А.М., Привалов А.Е.* Системы контроля и диагностирования бортового оборудования малого космического аппарата // *Изв. ВУЗов. Приборостроение.* 2009. Т. 52. № 4. С. 51–56.
13. *Рябинин И.А., Черкасов Г.Н.* Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. Библиотека инженера по надежности. М.: Радио и связь, 1981.
14. *Буков В.Н., Озеров Е.В., Шурман В.А.* Парный мониторинг избыточных технических систем // *АиТ.* 2020. № 1. С. 93–116.
15. *Буков В.Н., Бронников А.М., Агеев А.М., Гамаюнов И.Ф., Озеров Е.В., Шурман В.Н.* Концепция управляемой избыточности комплексов бортового оборудования // *Науч. чтения по авиации, посв. памяти Н.Е. Жуковского. Матер. XVI Всерос. науч.-практ. конф. / Гл. ред. С.П. Халютин (11–12 апр. 2019, Москва).* М.: Изд. дом Акад. им. Н.Е. Жуковского, 2019. С. 17–33.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.И. Васильевым.

Поступила в редакцию 05.07.2019

После доработки 19.11.2019

Принята к публикации 28.11.2019