

Управление в технических системах

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

ПАРНЫЙ МОНИТОРИНГ ИЗБЫТОЧНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ставится и решается детерминистская задача одновременного контроля технического состояния в реальном времени (мониторинга) как основной (функциональной), так и контролирующей (мониторинговой) частей системы. Предлагается подход, основанный на логическом анализе результатов встроенного контроля пары сопоставимых технических устройств, в общем случае разнородных по изготовлению и инфраструктурной поддержке. Получены структура и правила формирования индикаторной матрицы, позволяющей разделить технические устройства на полностью или частично исправные и неисправные. Приводятся выражения для вероятностей обнаружения неисправностей обеих частей системы и для вероятностей совершения ошибок первого и второго рода. Показаны методические примеры.

Ключевые слова: комплекс оборудования, функциональный модуль, мониторинговый модуль, функциональный узел, булев и не булев формализмы, индикаторная матрица исправности, индикаторное правило логического парного мониторинга.

DOI: 10.31857/S0005231020010079

1. Введение

Возросшие возможности информационного и математического обеспечения процессов управления сложными динамическими системами позволяют принципиально по-новому подойти к удовлетворению постоянно ужесточаемых требований к их отказоустойчивости, в том числе на основе управляемой избыточности [1], которая подразумевает преднамеренную избыточность системы, поддерживаемую специализированными средствами управления и придающую системе такие свойства, как

отказоустойчивость,

повышенная общая производительность/мощность,

существенно увеличенный межрегламентный период,

оперативное изменение различных эксплуатационных характеристик (точность, расходование энергии/ресурса определенных компонентов и др.).

Сказанное в полной мере относится к подвижным объектам [2–4] и технологическим процессам [5] с избыточными комплексами оборудования (КО).

По крайней мере одно из направлений управления избыточностью перспективных КО [1, 6] предполагает выполнение в реальном времени процедуры мониторинга технического состояния [7, 8] компонентов комплекса с целью его реконфигурирования при неправильном функционировании. Термин “мониторинг” как транслитерация англоязычного термина [8, 9], по мнению авторов, точнее передает специфику проверки технического состояния системы в реальном времени, чем широко распространенные термины “контроль” и “диагностирование”, по определению [10] относящиеся практически к любым ситуациям.

Среди различных постановок задачи мониторинга можно выделить задачу дихотомического мониторинга, при котором результатом каждый раз является одно из двух суждений: “исправен” или “неисправен”; такой результат используется, например, при формировании индексов готовности компонентов для выбора подходящей конфигурации КО [1, 6].

Разработанный и предлагаемый детерминистский подход относится к мониторингу разнообразных технических устройств с аппаратной избыточностью независимо от их конструктивных особенностей и от характера и обстоятельств возникновения неисправностей. Подход применим при выполнении двух условий:

наличие (или возможность создания) встроенных средств контроля [9] (встроенных средств технического диагностирования [10]),

доступность для управления физических или виртуальных связей между частями технического устройства, несущими функциональную нагрузку, и встроенными в него средствами диагностирования.

2. Состояние проблемы

Диагностированию технического состояния систем (Fault Detection and Isolation – FDI) за последние 20 лет уделено большое внимание [8, 11–16]. Сложившиеся направления исследований могут быть разделены на две группы, связанные с использованием аппаратной или аналитической избыточности. Первая из них подразумевает избыточность конструктивных компонентов (элементов, узлов, подсистем), сопоставительный анализ функционирования которых позволяет при выполнении определенных условий вычислить наличие и место неисправности. Вторая группа направлений предполагает вместо аппаратной избыточности использование математических моделей объектов мониторинга, что создает предпосылки не только для достижения лучших массовых и энергетических характеристик в целом, но и для повышения результативности мониторинга за счет вскрытия внутренних причинно-следственных связей диагностируемых объектов.

Вместе с тем основными средствами диагностики (контроля) технического состояния различных видов оборудования в настоящее время являются встроенные средства технического диагностирования [10] (распространен также [9, 17, 18] термин “встроенные средства контроля” – ВСК), специально вводимые в состав устройств комплекса, и внешние автоматизированные системы контроля (АСК) [19]. Этими средствами обеспечивается контроль (надзор над) функциональных модулей (ФМ) оборудования, выполняющих

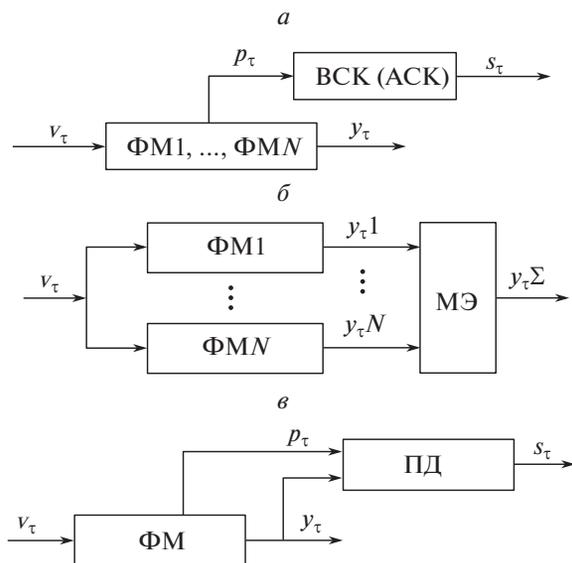


Рис. 1. Схемы контроля ФМ посредством ВСК или АСК: *a* – в обобщенном виде, *б* – мажоритарного контроля, *в* – контроля с использованием правил достоверности.

задачи его прямого предназначения, с целью определения их технического состояния (чаще в терминах состояний “исправен” или “неисправен”).

ВСК контролируют параметры ФМ в соответствии с критериями выполнения требуемых функций [20].

Рисунок 1,*a* иллюстрирует в обобщенном виде такое решение. На рисунке использованы обозначения: τ – текущее время (номер цикла мониторинга), v_τ – входные данные, y_τ – выходные данные, p_τ – контролируемые параметры, s_τ – оценка состояния ФМ.

В общем случае входные v_τ и выходные y_τ данные могут входить в число параметров, контролируемых с помощью ВСК (на схеме рис. 1,*a* и далее это не показано графически во избежание загромождения рисунков излишними деталями непринципиального характера).

Построение ВСК и АСК уровня системы (комплекса) связано с применением различных методов параметрического контроля, основанных обычно на следующих двух подходах.

1. *Мажоритарный контроль*. Неисправный ФМ определяется с помощью мажоритарного элемента (МЭ) путем обработки результатов функционирования нескольких подключенных ФМ. Схема показана на рис. 1,*б*.

Суждение о неисправности ФМ делается на основе значительного (наибольшего или превышающего пороговое значение) отклонения его выхода от выходов большинства других однотипных модулей.

Основные особенности метода включают:

а) предположение о неизменности технического состояния ФМ в пределах цикла τ ;

- б) предположение о том, что МЭ может быть только исправным;
- в) применимо к числу ФМ, превышающему 2;
- г) предположение о том, что с учетом правил голосования (равноправное, взвешенное, с дискриминациями и пр.) исправные ФМ внутри каждого цикла τ составляют большинство (доминируют над неисправными);
- д) общий поток данных для всех ФМ.

2. *Использование правил достоверности* (ПД). В зависимости от конкретных условий и решений в качестве таких правил могут выступать: сравнение с эталонными моделями, фиксирование нарушений заданных временных и/или параметрических интервалов (контроль по допуску на параметр [15]), проверка логических и других соотношений, вычисление инвариантов разных порядков и пр. Такой способ иллюстрируется на рис. 1,6, где показана связь ПД с выходом ФМ y_τ , поскольку часто именно она является существенной, что далее иллюстрирует второй пример в разделе 9.

Особенности метода, основанного на использовании ПД:

- а) в пределах цикла τ исправность ФМ не изменяется;
- б) предполагается, что элемент ПД может быть только исправным, в том числе при наличии эталонной модели, которая может быть только исправной;
- в) предполагается, что входные v_τ и выходные y_τ данные в достаточной степени информативны.

Предположение о непрерывной исправности так называемого заключительного звена (указанных МЭ и ПД) схемы контроля является серьезной проблемой систем диагностирования вообще и мониторинга текущего технического состояния в частности, поскольку оно целиком или частично выпадает из-под диагностирования.

Для решения этой проблемы практикуется, например, многократное мажорирование, при котором результаты мажоритарного контроля нижнего уровня подвергаются мажорированию более высокого уровня. Однако при этом всегда присутствует самый верхний уровень, результаты которого следует принимать “на веру”.

Кроме того, многоуровневому мажоритарному контролю [21] присущи следующие недостатки:

низкая эффективность мажоритарного сравнения сигналов при неоднородной избыточности вычислительных средств;

значительный объем вычислений, связанных с многоуровневым мажоритарным контролем в сочетании со статистической обработкой сигналов трактов;

сложность самого устройства, что вместе с отсутствием у него встроенного самоконтроля снижает соответствующий технический эффект.

Другой известный путь преодоления указанной проблемы заключается в организации самоконтроля самих схем диагностирования. В основном это относится к сложной микропроцессорной технике¹ и сопряжено, как правило, с реализацией тестового контроля, что для мониторинга в реальном времени неприменимо.

¹ URL: <https://wikidalka.ru/4-79748.html>

Подводя итог краткому обзору, можно отметить, что, в целом, проанализированные подходы обладают серьезными ограничениями, исключаящими и в значительной степени затрудняющими или ставящими в зависимость от сильных² предположений построение систем мониторинга исправности компонентов КО в реальном времени (в рабочих режимах).

3. Формальные основы логического мониторинга

Сформулируем задачу мониторинга следующим образом. Пусть некоторый функциональный модуль (ФМ) на интервале времени τ решает какую-либо содержательную задачу. Одновременно за его функционированием “наблюдает” мониторинговый модуль (ММ), в решении содержательной задачи участия не принимающий. По выходному сигналу ММ формируется суждение об исправности или неисправности ФМ. При этом возможно неправильное функционирование как ФМ, так и ММ. Кроме того, возможное неправильное функционирование ФМ или ММ не влияет на работоспособность друг друга. Ставится задача получить оценку работоспособности (дихотомическую оценку “исправен” или “неисправен”) ФМ и одновременно установить исправность или неисправность ММ.

Схематическое изображение соединения ФМ+ММ, в дальнейшем называемого функциональным узлом (ФУз), показано на рис. 2.

Внешне эта схема похожа на схему рис. 1,а, однако принципиальным отличием является допущение возможности неисправного состояния не только ФМ, но и ММ. Жирными стрелками на рис. 2 условно показаны в общем случае многомерные входные v_τ и выходные y_τ каналы данных (сигналы), а также контролируемые параметры p_τ . Все они могут иметь различную физическую природу. Тонкой стрелкой обозначена оценка s_τ технического состояния ФМ, формируемая на выходе ММ и представляющая собой бинарную переменную “исправен” или “неисправен”.

Характер рассматриваемых неисправностей ФМ может быть любым как в смысле природы возникновения, так и по проявлению при неперменном

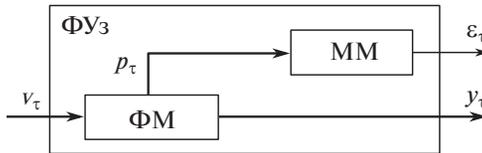


Рис. 2. Схема функционального узла ФМ+ММ.

условии, что эти неисправности ФМ обнаруживаются исправным ММ, представляющим собой соответствующий вариант ВСК.

В известных публикациях [14–17] приняты упрощенные обозначения (логические переменные состояния, булевы переменные): “1” – рассматриваемое

² К такому относится предположение о неперменной исправности ВСК или их частей.

устройство исправно, “0” – неисправно. При предположении возможной неисправности как ФМ, так и ММ логика зависимости состояния исправности ФУз от состояния исправности ФМ и/или ММ выражается булевой формулой логического умножения (конъюнкции):

$$(1) \quad \begin{aligned} \text{исправный ФМ и исправный ММ:} & \quad 1 \times 1 = 1, \\ \text{отказавший ФМ и исправный ММ:} & \quad 0 \times 1 = 0, \\ \text{исправный ФМ и отказавший ММ:} & \quad 1 \times 0 = 0, \\ \text{отказавший ФМ и отказавший ММ:} & \quad 0 \times 0 = 0. \end{aligned}$$

Здесь исправному состоянию ФУз соответствуют только исправные состояния обоих его модулей.

Отказы ММ, по-видимому, можно в первом приближении подразделить на два вида: простые отказы “залипание на 1” и “залипание на 0” (аналоги “замыкания” и “разрыва” в электрических цепях) и сложный отказ “инверсия значения исправности ФМ”. При этом сложный отказ на каждом отдельном цикле мониторинга, по крайней мере в детерминистской задаче³, очевидным образом сводится к одному из простых отказов. Если это справедливо, то при отказных состояниях ММ выдаваемый им результат будет неотличим от результата при исправном или неисправном состоянии ФМ (и ФУз).

Подобная ситуация маскирования действительного состояния ФУз и ФМ при отказе ММ имеет место и при использовании не булевой логики состояний с другими обозначениями состояния исправности устройств, например: “1” – при исправном состоянии, “–1” – при неисправном:

$$(2) \quad \begin{aligned} \text{исправный ФМ и исправный ММ:} & \quad 1 \times 1 = 1, \\ \text{отказавший ФМ и исправный ММ:} & \quad (-1) \times 1 = (-1), \\ \text{исправный ФМ и отказавший ММ:} & \quad 1 \times (-1) = (-1), \\ \text{отказавший ФМ и отказавший ММ:} & \quad (-1) \times (-1) = 1. \end{aligned}$$

Здесь значение “–1” логического выхода ММ соответствует неправильному функционированию либо ФМ, либо ММ. Одновременное неправильное функционирование ФМ и ММ приводит к значению “1” на выходе ММ, т.е. такое состояние ФУз неразлично с правильным функционированием обоих модулей.

Возможности указанных формализмов ограничены при их использовании для автономного (самостоятельного) мониторинга ФУз из-за существенной неопределенности возможных результатов.

4. Парный мониторинг на основе логических правил

Для преодоления возникающих неопределенностей предлагается организовать парный мониторинг функциональных узлов ФМ+ММ с использованием любого из формализмов (1) или (2). При этом принимаются не очень существенные и широко распространенные на практике предположения.

³ В стохастической задаче может возникнуть необходимость различения простых и сложных отказов.

А. Потоки данных через различные ФМ не связаны между собой (функциональная автономность ФМ).

Б. Каждый функциональный узел ФМ+ММ изготавливается на технологической базе и поддерживается инфраструктурными средствами, не зависящими от базы и средств других ФУз (конструктивная разнородность ФУз).

В. Все ФМ и ММ изготовлены 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).

Принципиально важным следствием предположения Б является практическая невозможность одновременной неисправности двух ФМ и/или двух ММ в двух различных функциональных узлах. Само же такое предположение является распространенным, например, в авиаприборостроении. Так, при создании систем авионики высокой ответственности практикуется разнородное исполнение (наличие не связанных между собой нескольких разработчиков электронной компонентной базы и программного обеспечения) авиационных компонентов. Преследуемая цель: минимизация системных конструктивных и программных ошибок, практически не обнаруживаемых при единственном разработчике систем.

С учетом предположений А и В предлагаемая схема применима к подавляющему большинству технических систем с избыточностью.

Результат оценивания работоспособности ФУз в паре с учетом предположения Г удобно представлять оценочной матрицей (ОМ) размеров 2×2 с бинарными элементами вида

$$(3) \quad S_{\tau}^{\text{оц}} = \begin{bmatrix} s_{\tau}^{1-1} & s_{\tau}^{1-2} \\ s_{\tau}^{2-1} & s_{\tau}^{2-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\text{ФМ.1}} \\ c_{\text{ФМ.2}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_{\text{ММ.1}} & c_{\text{ММ.2}} \end{bmatrix},$$

где $c_{\text{ФМ.}i}$ — логическое состояние i -го ФМ, $c_{\text{ММ.}j}$ — логическое состояние j -го ММ. Логические состояния модулей $c_{\text{ФМ.}i}$, $c_{\text{ММ.}j}$ и узлов s_{τ}^{i-j} при различных технических решениях могут соответствовать булеву (1) или не булеву формализму (2). Таким образом, первая строка ОМ — результат оценки исправности ФМ1 двумя ММ, первый столбец ОМ — результат оценки исправности обоих ФМ посредством ММ1 и т.д.

Схематическое решение парного мониторинга с ОМ иллюстрирует рис. 3.

Ключевой особенностью схемы рис. 3 является одновременное или поочередное в пределах одного цикла диагностирование каждым ММ каждого ФМ.

Кроме того, важным обстоятельством является то, что “взаимное проникновение” ФУз в паре происходит исключительно на уровне ММ, осуществляющих контроль ФМ. В то же время ни один из ФМ не вмешивается в работу другого ФМ, как и оба ММ не вмешиваются в работу ни одного из ФМ, в соответствии с принятым, в частности в авионике, принципом разделения.

Функцию заключительного звена в такой схеме играет сочетание аппаратно-программных средств, накапливающих (при мониторинге на одном цикле τ), хранящих и выдающих по запросу значения элементов матри-

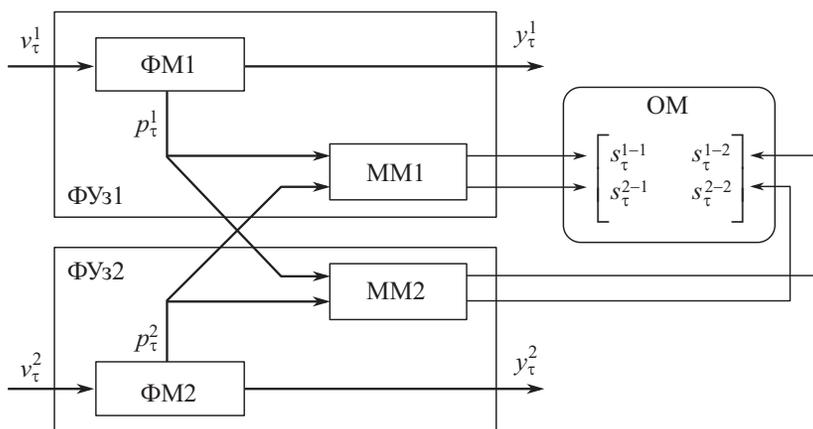


Рис. 3. Схема парного мониторинга функциональных узлов.

цы ОМ $S_{\tau}^{ом}$, а также переключающих каналы передачи данных. В зависимости от конкретных условий такое звено может либо принадлежать внешнему модулю, либо дублироваться в каждом из ММ.

Критичность выхода заключительного звена из-под контроля определяется относительной долей аппаратно-программных средств, реализующих это звено. Исследования показывают, что такая доля может быть сведена до весьма малых размеров.

С учетом принятого предположения Б и используемых формул логики (1) и (2) возможны исходы оценивания, т.е. значения логических оценок “исправен” или “неисправен” на выходах ММ, показанные на рис. 4 и 5. На обоих рисунках ОМ (3), относящиеся к разным комбинациям правильно и неправильно функционирующих модулей, выделены различными областями:

- А – оба ФУз однозначно исправны;
- В – неисправен один из ФМ с указанием, какой именно;
- С – неисправен один из ММ с указанием, какой именно;
- Д – неисправны по одному различному модулю в каждом ФУз;
- Е – неисправны одновременно ФМ и ММ в одном из ФУз.

При этом в зависимости от используемых формул (1) или (2) области Д и Е характеризуются различной однозначностью. Если при булевом формализме (1) для ФУз пары, результат мониторинга которой соответствует области Д, дается конкретное указание на исправное сочетание модулей ФМ1+ММ2 или ФМ2+ММ1, то при не булевом формализме такого указания нет. Аналогично для пары с результатом в области Е булев формализм различает узлы с исправными и неисправными модулями, в то время как не булев формализм этого не делает.

Заключение о полной или частичной исправности и неисправности вместе с дальнейшими действиями определяются следующим образом:

а) оба функциональных узла пары, результат мониторинга которой соответствует области А, могут использоваться по назначению;

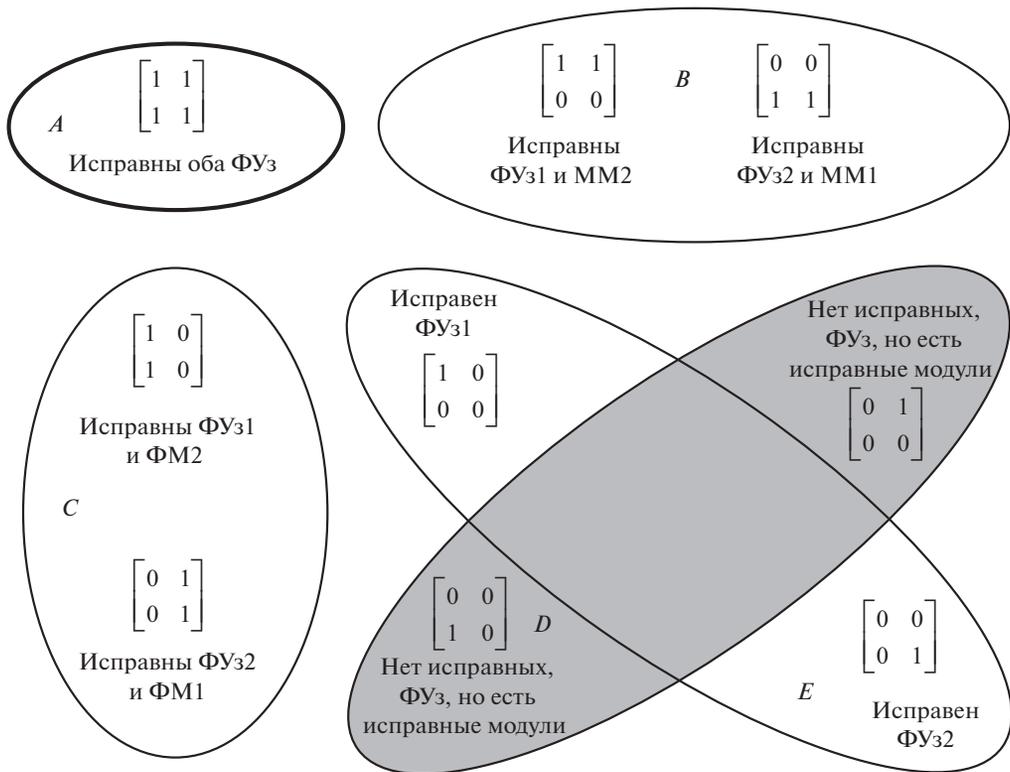


Рис. 4. Исходы парного мониторинга на основе булева формализма (1).

б) кроме того, может использоваться один (конкретный) функциональный узел из пары, результат мониторинга которой соответствует области В или С, а при булевом формализме еще один (конкретный) ФУз из пары, результат мониторинга которой соответствует области Е;

в) если модули ФУз конструктивно неразделимы и неисправность любого из модулей объявляется неисправностью узла в целом, то следует отказаться от последующего использования конкретного ФУз пары, результат мониторинга которой соответствует области В или С, при булевом формализме – одного конкретного функционального узла пары в области Е, а при не булевом формализме – одного ФУз пары в этой области, но для его выявления следует использовать парный мониторинг в сочетании с другими функциональными узлами;

г) если возможна перекомпоновка функциональных узлов, то с учетом предположения В можно создать дополнительные исправные ФУз, взяв исправный ФМ из неисправного узла пары, попавшей в область С, и объединить его с исправным ММ из неисправного узла пары, попавшей в область В; дополнительные возможности связаны с использованием модулей из ФУз пар в области D.

Однако описанная схема мониторинга обладает недостатком: она не полностью согласуется с практическими ситуациями, когда выходной сигнал

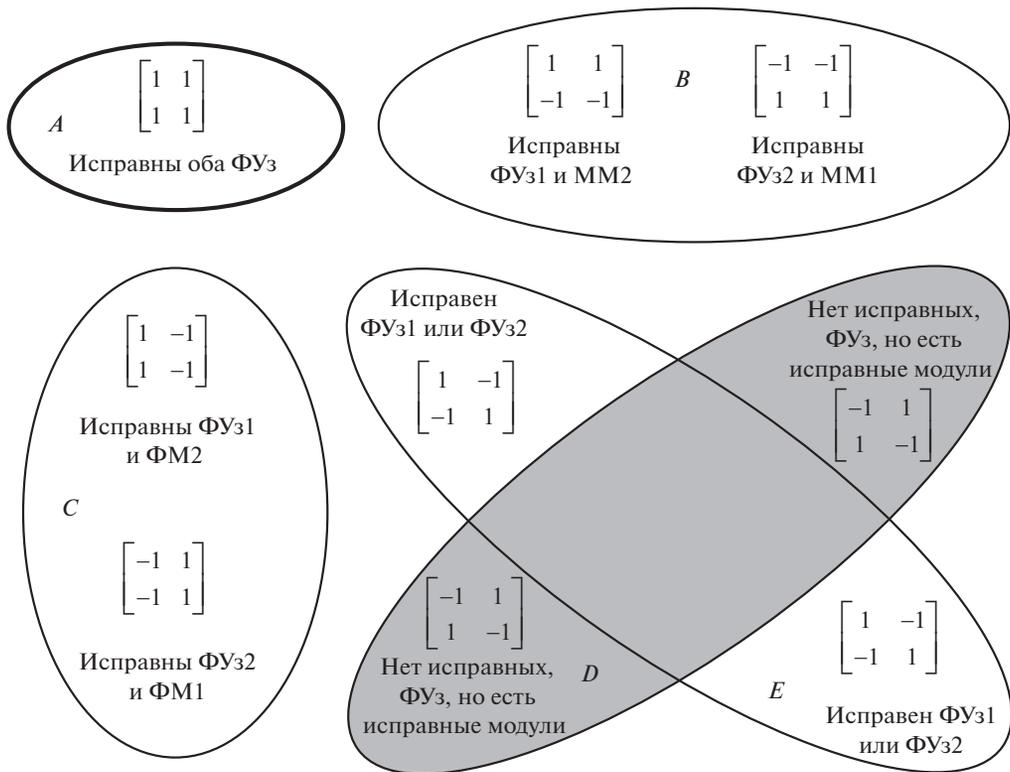


Рис. 5. Исходы парного мониторинга на основе не булева формализма (2).

какого-либо из ММ принимает фиксированное (неизменное) значение “1” или “0” (“константный отказ”).

На основе обобщения и расширения комбинаций, представленных на рис. 4 и 5, сформулируем индикаторное правило логического парного мониторинга, лишенное указанных недостатков.

5. Индикаторное правило логического парного мониторинга

Введем индикаторную матрицу (ИМ) $S_{\tau}^{\text{инд}}$ размеров 2×2 с бинарными элементами, для которой может применяться любой из формализмов (1) и (2) и в то же время некоторые из элементов которой, названные в статье “странными”, в отличие от (3) могут не соответствовать формулам ни одного из формализмов (1) и (2). Возникновение и использование “странных” элементов поясняются в этом разделе далее.

Схема парного мониторинга с ИМ, который назовем логическим парным мониторингом (ЛПМ), аналогична схеме, показанной на рис. 3, с заменой ОМ $S_{\tau}^{\text{оц}}$ на ИМ $S_{\tau}^{\text{инд}}$.

Можно убедиться, что с учетом предположения Б полная группа значений ИМ включает 13 различных матриц.

Используемые далее обозначения соответствуют булевой формализму (1).

Индикаторное правило ЛПМ. Выделение полностью или частично исправной пары функциональных узлов сводится к проверке структуры ИМ

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

где s_{τ}^{i-j} – выраженный логической переменной результат проверки i -го ФМ посредством j -го ММ, уникальный вид которой соответствует (является индикатором) определенной комбинации исправных и неисправных узлов:

однозначно исправен ФУз1 при значениях ИМ:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{\text{дополнительно исправен ММ2}}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}_{\text{дополнительно исправен ФМ2}}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

однозначно исправен ФУз2 при значениях ИМ:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}_{\text{дополнительно исправен ММ1}}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{\text{дополнительно исправен ФМ1}}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

однозначно нет исправных ФУз при значениях ИМ:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}_{\text{исправны ФМ2 и ММ1}}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}_{\text{исправны ФМ1 и ММ2}}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}_{\text{исправны ФМ2 и ММ1}}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{\text{исправны ФМ1 и ММ2}};$$

неоднозначно: либо все ФУз исправны, либо один из них (а именно, ММ с ложной выдачей “1”) неисправен при значении ИМ:

$$(4) \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Указанная неоднозначность и “ошибочное принятие⁴ исправного ФМ за исправный” (на выходе неисправного ММ оценка “ФМ исправен”, не зависящая от состояния ФМ, относится к ФМ, который в действительности является исправным) не приводят непосредственно к негативным последствиям в текущем цикле.

⁴ Обнаружение неисправности ММ возможно проверкой с тестом, что неприемлемо для мониторинга.

Неисправность* одного из ФМ	Неисправность** одного из ММ				
	ММ1		ММ2		отсутствует
	ложная “1”	ложный “0”	ложная “1”	ложный “0”	
ФМ1	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
ФМ2	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
отсутствует	см. ***	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	см. ***	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ ***

*неадекватное выполнение возложенных функций, которое должно обнаруживаться посредством ММ,

**ложная выдача “исправен” или “неисправен”,

***неоднозначно, кроме полной исправности узлов возможна неисправность ММ1 или ММ2 с ложной выдачей “исправен”.

Приведенное правило компактно иллюстрируется таблицей.

Если же в конкретных системах число функциональных узлов превышает два, то должен осуществляться попарный мониторинг всех ФУз, а в случае нечетного их количества какой-то из узлов подвергнется проверке дважды, что не приносит каких-либо методических и технических проблем. Если исправных узлов окажется больше единицы, то выбор предпочтения среди исправных ФУз выходит за рамки собственно мониторинга. Соответствующее решение при выборе конфигурации бортового комплекса описано в [6].

Обоснованность правила подтверждает следующий анализ.

Если ММ исправен, то он будет отражать действительное состояние ФМ, т.е. информировать о его исправности или неисправности. Возможно применение любого из формализмов (1) или (2):

$$(5) \quad 1 \times \underbrace{1}_{\text{исправность ММ}} = \underbrace{1}_{\text{истинный ответ}}, \quad 0 \times \underbrace{1}_{\text{исправность ММ}} = \underbrace{0}_{\text{истинный ответ}}$$

или $1 \times 1 = 1, \quad (-1) \times 1 = (-1)$.

Дело обстоит сложнее при неисправном ММ. Пусть его выход не зависит от состояния ФМ и может принимать значение как “1”, так и “0” (или “-1”, в зависимости от формализма). Подробнее для каждого из этих вариантов:

а) неизменная выдача значения “исправен”, т.е. “1” на выходе ММ:

при исправном ФМ получается, что ММ сработал как исправный при любом формализме, и ситуация нераспознаваема, т.е. отличить неисправное состояние функционального узла от исправного невозможно, но и негативных последствий тоже нет:

$$(6) \quad 1 \times \underbrace{1}_{\text{фиксированный отказ ММ}} = \underbrace{1}_{\text{истинный ответ}},$$

при неисправном ФМ ситуация соответствует только формализму (2):

$$(7) \quad (-1) \times \underbrace{(-1)}_{\substack{\text{фиксированный} \\ \text{отказ ММ}}} = \underbrace{1}_{\substack{\text{ложный} \\ \text{ответ}}},$$

формализм же (1) неприменим;

б) неизменная выдача значения “неисправен”, т.е. “0” или “-1” на выходе ММ:

при исправном ФМ результат соответствует любому из формализмов

$$(8) \quad 1 \times \underbrace{0}_{\substack{\text{фиксированный} \\ \text{отказ ММ}}} = \underbrace{0}_{\substack{\text{истинный} \\ \text{ответ}}} \quad \text{или} \quad 1 \times \underbrace{(-1)}_{\substack{\text{фиксированный} \\ \text{отказ ММ}}} = \underbrace{(-1)}_{\substack{\text{истинный} \\ \text{ответ}}}$$

и указывает на наличие неисправности в функциональном узле,

при неисправном ФМ получаем выполнение только формализма (1):

$$(9) \quad 0 \times \underbrace{0}_{\substack{\text{фиксированный} \\ \text{отказ ММ}}} = \underbrace{0}_{\substack{\text{истинный} \\ \text{ответ}}},$$

формализм (2) неприменим.

Таким образом, при описанном характере неисправностей налицо смешение двух формализмов (1) и (2), что предусмотрено сформулированным индикаторным правилом ЛПИМ.

Пусть теперь образована пара функциональных узлов в соответствии с рис. 3, т.е. ФУз1 (ФМ1+ММ1) и ФУз2 (ФМ2+ММ2).

Если оба ФУз исправны, то результат в виде ИМ на выходах ММ совпадает с (3) и содержит все единичные элементы.

Если неисправен только ФМ1 (или ФМ2), то ИМ в соответствии с (5) принимает значение

$$(10) \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \left(\text{или} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right).$$

Если неисправен только ММ1 (или ММ2), неизменно выдавая “1”, то ИМ в соответствии с (6) не противоречит исправности обоих ФУз

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \left(\text{и} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \right),$$

а неизменно выдавая “0”, ошибочно приписывает неисправность исправным ФМ1 и ФМ2 одновременно, тем самым в соответствии с (8) раскрывая свое неисправное состояние (противоречит предположению Б) и отрицая исправность своего ФУз

$$(11) \quad \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\text{или} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right).$$

При одновременной неисправности ФМ1 и ММ1 (или ФМ2 и ММ2) с неизменной выдачей оценки “1” в соответствии с (4) и (6) получается значение ИМ

$$(12) \quad \begin{bmatrix} \boxed{1} & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \left(\text{или} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & \boxed{1} \end{bmatrix} \right),$$

указывающее на исправность ФУз2 (или ФУз1). Здесь взятые в рамки значения “1” символизируют появление “странного” значения “1” на выходе ММ1 (или ММ2).

Странность заключается в том, что такое значение не соответствует ни одному из описанных в разделе 3 формализмов (см. комментарий к (7)). И хотя пользователь не может знать о странности одного из элементов ИМ, это не влияет на работоспособность индикаторного правила. Нужное решение формируется безошибочно. В отличие же от (10) в этом случае делается вывод об отсутствии исправных модулей за пределами ФУз2 (ФУз1).

При одновременной неисправности ФМ1 и ММ1 (или ФМ2 и ММ2) с неизменной выдачей оценки “0” в соответствии с (8) и (9) получается значение ИМ

$$(13) \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\text{и} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right),$$

что в силу формализма (1) указывает на исправность только ФУз2 (или ФУз1).

При одновременной неисправности ФМ1 и ММ2 (или ФМ2 и ММ1) с выдачей “1” неисправным ММ получается значение ИМ

$$(14) \quad \begin{bmatrix} 0 & \boxed{1} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \left(\text{или} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \boxed{1} & 0 \end{bmatrix} \right),$$

со “странным” элементом, о странности которого пользователь не подозревает. Вместе с тем вид ИМ позволяет утверждать об отсутствии исправных ФУз. Выдача “0” неисправным ММ2 (или ММ1) приводит к значению ИМ

$$(15) \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \left(\text{и} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right),$$

что тоже свидетельствует об отсутствии исправных функциональных узлов.

Можно убедиться, что указанный в разделе 3 сложный отказ в виде инверсии оценки состояния ФМ корректно отражается в ИМ (11)–(15).

6. Использование логического парного мониторинга

Использование индикаторного правила ЛПМ позволяет однозначно⁵ устанавливать техническое состояние ФМ. Так, например, для подтверждения исправности ФМ1 без акцентирования внимания на других модулях схемы

⁵ В исходной детерминистской постановке решаемая задача не предусматривает вероятностные понятия типа ошибок 1-го и 2-го рода. Иное излагается в разделе 8.

ЛПМ (рис. 3) требуется убедиться, что ИМ либо принимает одно из значений

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ или } \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

либо не принимает ни одного из значений

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ или } \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

при обязательном удовлетворении предположения Б.

Другой вариант использования ЛПМ выглядит следующим образом. Если ИМ принимает одно из значений

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ или } \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

то исправны оба ФМ в паре функциональных узлов. При значениях ИМ

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ или } \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

среди ФМ пары исправен только ФМ1, а при значениях

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ или } \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

– только ФМ2. При этом исправность или неисправность ММ не отмечается.

Аналогично можно выбрать комбинации значений ИМ для суждения об исправности только ММ с той лишь особенностью, что если ИМ принимает значение (4), то один из ММ следует подозревать (но не более того) в неисправности.

Для снятия подозрений следует, если это не противоречит позиции разработчика⁶, внести управляемую неисправность в один из заведомо исправных ФМ, например в ФМ1. При этом неисправность одного из ММ проявится в виде значения ИМ

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ или } \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

которое в соответствии с таблицей индикаторных матриц укажет на неисправный ММ.

Основная направленность предлагаемой разработки связана с так называемыми избыточными комплексами бортового оборудования, где по разным причинам (вследствие как традиционно практикуемого, так и сознательно

⁶ Действие относится к тест-контролю, обычно не применяемому в процедурах мониторинга.

вводимого функционального и структурного резервирования в интересах повышения безопасности, достижения живучести и необслуживаемости в межрегламентные периоды) количество и функциональность компонентов заведомо превышает необходимый минимум.

Поэтому наиболее простая область применения – мониторинг идентичных компонентов, каждый из которых содержит идентичные функциональные и мониторинговые модули. Более отдаленная перспектива – функционально избыточные компоненты, позволяющие решать аналогичные задачи на основе разных физических принципов и технических решений. Для этого, естественно, потребуется развитие подхода.

7. Варианты исполнения функциональных узлов

В зависимости от конструкторских и иных возможностей может реализовываться какая-либо из приводимых далее схем или их комбинация.

1. *Мониторинг ФМ с его дубликатом.* Каждый ММ содержит копию (дубликат) “своего” ФМ идентичной физической природы или построенную на других физических принципах (например, математические модели процессов технического устройства). Рисунок 6,а иллюстрирует данный вариант. Здесь СС – схема сравнения (компаратор), подтверждающая “1” или отрицающая “0” совпадение сигналов y_τ на выходе ФМ и y_τ^M на выходе его физической или математической модели. Следует обратить внимание на то, что

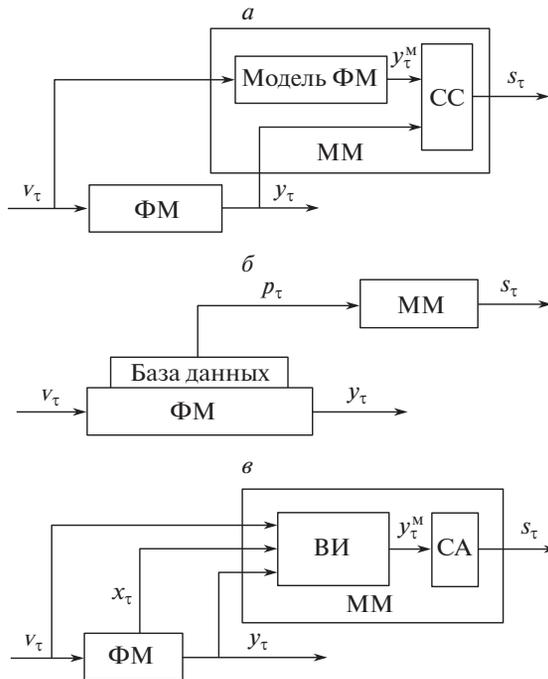


Рис. 6. Схемы функциональных узлов: а – с моделью, б – с учетом эксплуатационных данных, в – с вычислением инвариантов.

предлагаемый подход ЛПМ с натурным дубликатом ФМ в отличие от “почти аналогичного” традиционного дублирования позволяет однозначно выделить в паре исправный ФМ.

2. *Мониторинг ФМ по его эксплуатационным данным.* Схему соответствующего функционального узла поясняет рис. 6,б. Подразумевается, что непосредственно с ФМ конструктивно и функционально связан специальный элемент⁷ (чип), собирающий и накапливающий данные об условиях его использования и хранения. В число параметров p_τ , хранимых и выдаваемых таким чипом в ММ, входят различные данные о ФМ, включая:

паспортные данные,

результаты испытаний на разных стадиях жизненного цикла,

статистику эксплуатационных показателей и характеристик (оценки достигаемой точности, остаток ресурса, энергетические показатели и пр.),

статистику внешних воздействий во время использования по назначению, при хранении и регламентных работах.

На ММ же возлагается анализ поступающих данных и формирование на основе этого анализа суждения о возможной исправности или неисправности ФМ.

3. *Мониторинг ФМ по специальным соотношениям.* В этом случае ММ по получаемым из ФМ входным v_τ и выходным y_τ данным и промежуточным результатам x_τ определяет некоторые показатели или проверяет характерные соотношения (инварианты), которые при правильном функционировании ФМ должны удовлетворяться, а в случае его неправильного функционирования – нарушаться. Рисунок 6,в поясняет соответствующую схему ФУз. Здесь ВИ – вычислитель инвариантов, СА – схема анализа инвариантов. Функционирование парного мониторинга в данном варианте функционального узла поясняет первый из примеров в разделе 9.

Заметим, что правила сертификации изделий авионики по высшей категории А предполагают наличие ММ, встроенного в изделие, который осуществляет на одном и том же потоке входных данных параллельно с ФМ вычисление выходных параметров на альтернативной основе (упрощенно и потому с высокой надежностью) и сравнение своего результата с результатом ФМ, что соответствует рис. 6,а и 6,в.

8. Эффект использования логического парного мониторинга

Расширим изначальную постановку задачи, добавляя вероятностную составляющую. В первом приближении можно полагать, что все функциональные узлы обладают одинаковыми вероятностными характеристиками исправности, а предположение Б, сделанное в разделе 4, строго выполняется. Тогда эффект, достигаемый при реализации ЛПМ, определяется следующим образом.

Полная группа независимых событий, связанных с техническим состоянием ММ (ВСК) каждого ФУз в каждом отдельном цикле τ мониторинга,

⁷ Идея и инициативные проработки принадлежат А.В. Дядищеву.

включает: исправное функционирование, выдачу ложной оценки “исправен” и выдачу ложной оценки “неисправен”. Здесь подразумевается, что ложные значения оценок существуют сами по себе и не связаны с возникновением одноименных истинных оценок.

Введем значения вероятностей возникновения неисправностей ММ (ВСК):

Q_1 – вероятность выдачи ложной оценки “исправен”,

Q_0 – вероятность выдачи ложной оценки “неисправен”.

Тогда при условии $Q_1 + Q_0 \leq 1$ вероятность исправного функционирования ВСК имеет значение $P = 1 - Q_1 - Q_0$.

Кроме того, в соответствии с конструктивными решениями и условиями функционирования ММ (ВСК) обнаруживает неисправности ФМ с определенной вероятностью $P_{\text{ВСК}}$, совершая ошибки 1-го рода (ложная тревога) с вероятностью $P_{\text{ВСК}|1}$ и 2-го рода (пропуск⁸ неисправности) с вероятностью $P_{\text{ВСК}|2}$.

При автономном использовании встроенных средств контроля вероятности того, что будет обнаружена возникшая неисправность ФМ или будет совершена ошибка какого-либо рода, определяются формулами:

$$\begin{aligned} P_{\text{обн ФМ}} &= P_{\text{ВСК}} (1 - Q_1 - Q_0), \\ P_{\text{обн ФМ}|1} &= P_{\text{ВСК}|1} + Q_0, \\ P_{\text{обн ФМ}|2} &= P_{\text{ВСК}|2} + Q_1. \end{aligned}$$

Использование же логического парного мониторинга в отношении контроля технического состояния ФМ исключает последний сомножитель в первой из этих формул и последние слагаемые в остальных, заменяя их на формулы:

$$P_{\text{обн ФМ}} = P_{\text{ВСК}}, \quad P_{\text{обн ФМ}|1} = P_{\text{ВСК}|1}, \quad P_{\text{обн ФМ}|2} = P_{\text{ВСК}|2}.$$

Кроме того, использование ЛПМ позволяет обнаруживать неисправности ММ, совершая ошибки 1-го или 2-го рода, с вероятностями:

$$\begin{aligned} P_{\text{обн ММ}} &= P_{\text{ВСК}}, \quad P_{\text{обн ММ}|1} = P_{\text{ВСК}|1} - \text{для всех значений ИМ}, \\ P_{\text{обн ММ}|2} &= P_{\text{ВСК}|2} - \text{для всех значений ИМ, кроме (4)}, \\ P_{\text{обн ММ}|2} &= P_{\text{ВСК}|2} + Q_1 - \text{для значения ИМ (4)}. \end{aligned}$$

Здесь указанный в разделе 5 случай со значением ИМ, равным (4), составляет исключение, когда ложное подтверждение одним из ММ (ВСК) исправности обоих ФМ оборачивается пропуском соответствующей неисправности этого ММ.

Таким образом, эффект соответствует использованию как бы “абсолютно надежных” ММ (ВСК) в отношении ФМ и “почти абсолютно надежных” ММ (с оговоркой об ИМ (4)) по отношению к самим себе.

⁸ Речь идет о неисправностях, которые ВСК должен обнаруживать. Неисправности же “вне ответственности” конкретного ВСК остаются за границами контроля технического состояния соответствующего изделия.

Для более тонкого анализа эффекта использования ЛПМ требуется введение различия вероятностных характеристик модулей разных узлов и, что более существенно, требуется допустить нарушение предположения Б с некоторой вероятностью. Однако это заслуживает особого внимания и не является предметом данной статьи.

9. Примеры

Преобразование векторов. Рассмотрим в качестве примера характерный фрагмент вычислений, выполняемых на борту воздушного судна.

Пусть ФМ – программный модуль преобразования вектора $\vec{OG}_H = [x_g \ y_g \ z_g]^T$ (скорость, орт линии визирования или др.), заданного проекциями на оси нормальной системы координат (СК) $OX_gY_gZ_g$ (направления осей ориентированы по характерным направлениям местности), в вектор $\vec{OG}_{CB} = [x \ y \ z]^T$, представленный проекциями на оси СК $OXYZ$, связанной с воздушным судном (направления осей ориентированы по характерным направлениям воздушного судна). Для преобразования вектора в ФМ производятся вычисления по формуле

$$\vec{OG}_{CB} = A_{CB}^H \vec{OG}_H,$$

где

$$A_{CB}^H = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & \sin \vartheta & -\cos \vartheta \sin \psi \\ -\cos \gamma \sin \vartheta \cos \psi + \sin \gamma \sin \psi & \cos \gamma \cos \vartheta & \cos \gamma \sin \vartheta \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \\ \sin \gamma \sin \psi \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi & -\sin \gamma \cos \vartheta & -\sin \gamma \sin \vartheta \sin \psi + \cos \gamma \cos \psi \end{bmatrix}$$

– ортогональная матрица преобразования координат из нормальной в связанную СК, γ – угол крена, ψ – угол рыскания, ϑ – угол тангажа. Относительную ориентацию этих СК и направления отсчета углов иллюстрирует рис. 7.

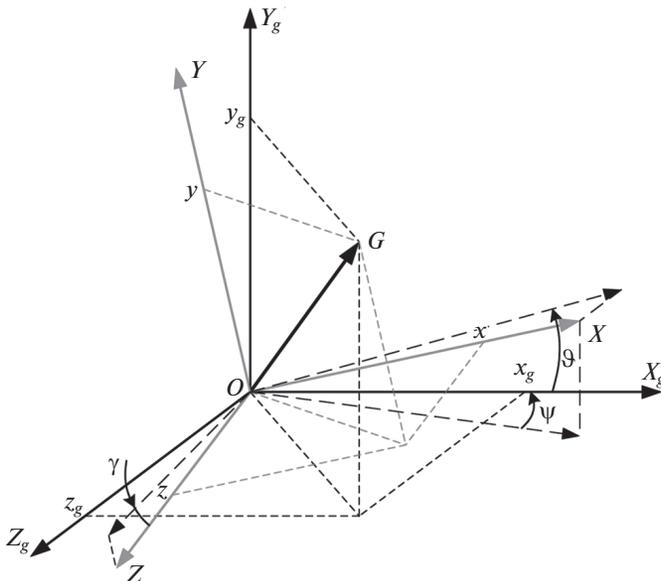


Рис. 7. Системы координат и преобразование проекций вектора.

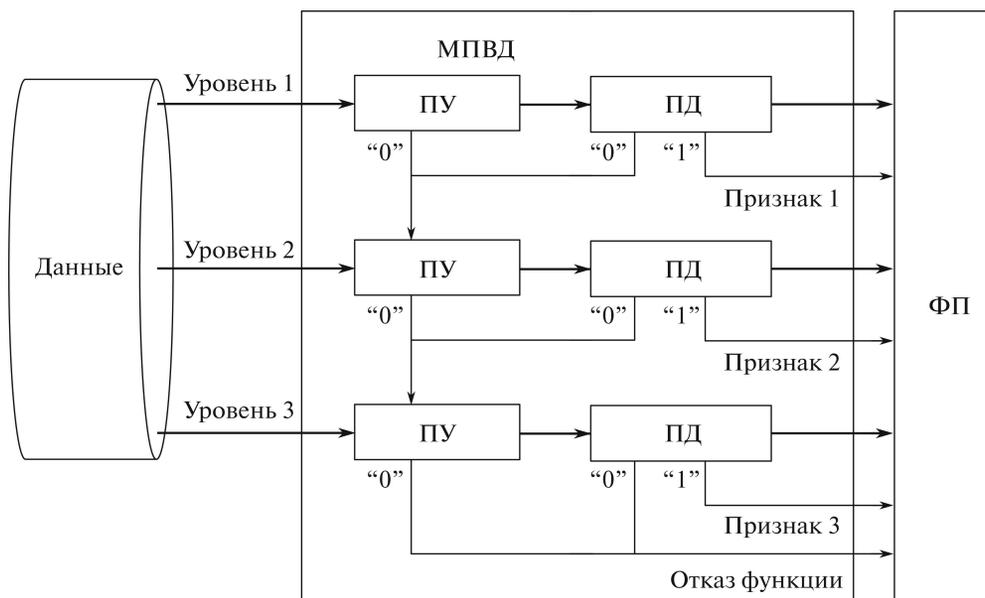


Рис. 8. Модуль проверки входных данных типовой функции авионики.

При этом ММ осуществляет мониторинг ФМ, выполняющего указанное преобразование, путем расчета и сравнения норм векторов (см. рис. 6, в):

$$\underbrace{(x_g^2 + y_g^2 + z_g^2)}_{\substack{\text{квадратичная} \\ \text{норма } \vec{OG}_H}} - \underbrace{(x^2 + y^2 + z^2)}_{\substack{\text{квадратичная} \\ \text{норма } \vec{OG}_{CB}}} = \Delta.$$

Эти нормы при безошибочных вычислениях должны совпадать, т.е. $\Delta = 0$. Таким образом, в случае совпадения норм векторов до и после преобразования ММ должен выдавать значение логической переменной “1”, в противном случае – “0”.

В результате ЛПМ двух узлов ФМ+ММ соответствующая ИМ $S_{\tau}^{\text{инд}}$ будет принимать одно из значений, перечисленных в индикаторном правиле, предоставляя тем самым возможность для оценивания работоспособности функциональных узлов в процессе их функционирования.

Проверка входных данных. В авионике принято решаемые в бортовом комплексе прикладные задачи называть функциями. Вычислители, реализующие какую-либо функцию, получают от периферийных систем данные нескольких уровней точности (возможно деление на уровни и по другому признаку).

Поступающие данные подвергаются входной проверке, выполняемой в соответствии с рис. 1, в и нацеленной на обнаружение отказов сопрягаемых датчиков информации и каналов связи. На рис. 8 показана упрощенная структура соответствующего ММ – модуля проверки входных данных (МПВД). Укрупненно эта проверка делится на проверку устойчивости (ПУ) приема кодовых слов, поступающих по каналу связи, и применения правил досто-

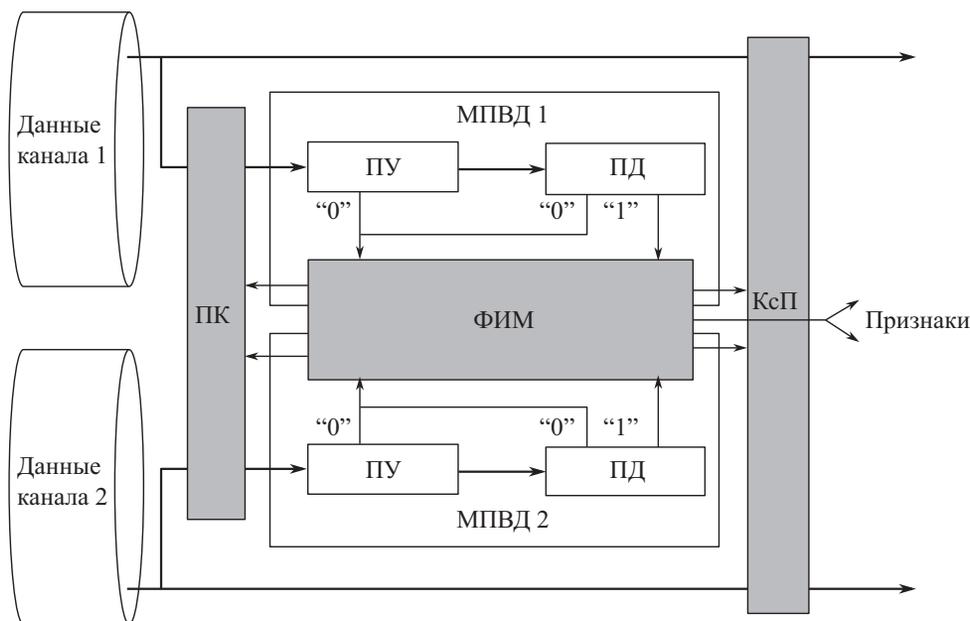


Рис. 9. Организация ЛПИМ для проверки данных i -го уровня в двух каналах.

верности (ПД) для получаемой информации. Проверка устойчивости заключается в проверке кодов и анализе временных интервалов их поступления, посредством чего обнаруживаются сбои и ошибки передачи данных. Проверка достоверности включает сравнение различных полученных параметров между собой и с заданными границами, позволяющее обнаружить большинство статических и динамических ошибок (независимо от природы их возникновения) источников информации.

Если входные данные уровня 1 отвечают критериям устойчивости и достоверности, то они без каких-либо изменений передаются в следующий модуль, реализующий функцию (функциональное приложение – ФП). Параллельно туда направляется признак исправности данных. Если же прием данных неустойчив или они не удовлетворяют критериям достоверности, то управление передается уровню 2, где проверочные процедуры повторяются, как правило, с другими требованиями. При необходимости цикл повторяется еще раз. Если данные последнего уровня не прошли контроль, то модуль выдает признак отказа функции, не передавая данные для дальнейшей обработки.

Так вкратце выполняются входные проверки в современной авионике. ФМ представляет собой определенный поток данных, а ММ – совокупность процедур параметрического контроля [18]. Проверки же логики работы самого ММ осуществляются периодически по тестовым наборам данных, т.е. вне реального времени и рабочего режима. Вопрос об исправности диагностического теста, который в интересах полноты может быть весьма сложным, остается открытым.

Предлагаемый подход в применении к описанному процессу иллюстрируется на рис. 9, где два ММ (МПВД 1 и МПВД 2) в составе разных вычисли-

тельных каналов, разнородных в указанном выше смысле, участвуют в ЛПМ. Признаки исправности или неисправности данных (в данном примере они в терминах мониторинга играют роль ФМ) и ММ формируются по ИМ $S_{\tau}^{\text{инд}}$ в соответствии с разделами 5 и 6.

Серым цветом на рисунке выделены дополнительные элементы (перекрестный коммутатор – ПК, формирователь индикаторной матрицы – ФИМ, коммутатор с потребителями – КсП), вместе играющие роль заключительного звена. И хотя эти элементы показаны как части схемы за пределами обоих проверочных модулей, при реализации они могут быть разнесены и/или частично дублированы в каждом из модулей.

Подчеркивается, что признаки исправности данных и модулей их проверки формируются одновременно в реальном времени и в рабочем режиме на каждом цикле мониторинга. Наличие перекрестной коммутации на входе и выходе ММ предоставляет дополнительные возможности для реконфигурации системы в целом [6].

Снятие же подозрения с одного из ММ в неисправности, заключающейся в ложной выдаче “1”, при получении значения ИМ (4) обеспечивается повторной проверкой данных с предварительным отключением в элементе ПК входа одного из МПВД (см. раздел 6).

10. Заключение

Показано, что существующие подходы к построению средств контроля технического состояния бортового оборудования обладают особенностями, исключаящими, в значительной степени затрудняющими или ставящими в зависимость от сильных предположений построение систем мониторинга исправности компонентов оборудования в реальном времени.

Предложен подход к осуществлению мониторинга путем совмещенного использования самостоятельного и взаимно-перекрестного контроля пары разнородных по производственным платформам избыточных узлов, каждый из которых содержит функциональный и мониторинговый модули, в одинаковой степени допускающие неправильное функционирование. Подход, названный логическим парным мониторингом (ЛПМ), позволяет установить исправность или одну–две неисправности как функциональных, так и мониторинговых модулей одновременно.

Достоинствами предложенного подхода ЛПМ являются:

однозначность определения технического состояния функциональных модулей в условиях возможных неисправностей как самих функциональных модулей, так и модулей, осуществляющих мониторинг их состояния;

определение одиночных и двойных неисправностей в соответствии с таблицей в разделе 5;

использование хорошо развитой технологии разработки и применения встроенных средств технического диагностирования;

относительно незначительное усложнение схематических и программных решений для реализации ЛПМ.

Эффект применения ЛПМ заключается в приведении традиционных встроенных средств контроля в разряд средств как бы “абсолютно надежных” в отношении контроля ФМ и “почти абсолютно надежных” в отношении контроля самих себя.

Приведенные примеры демонстрируют объекты для организации ЛПМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буков В.Н., Бронников А.М., Агеев А.М., Гамаюнов И.Ф., Озеров Е.В., Шурман В.А. Концепция управляемой избыточности комплексов бортового оборудования // Науч. чтения по авиации, посвящ. пам. 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.
2. Буков В.Н., Евгенов А.В., Шурман В.А. Интегрированные комплексы бортового оборудования с управляемой функциональной избыточностью // Актуальные проблемы и перспективные направления развития комплексов авиационного оборудования. Сб. науч. ст. по матер. V Междунар. науч.-практ. конф. “Академические Жуковские чтения” (22–23 нояб. 2017, Воронеж). Воронеж: КВАЛИС, 2018. С. 23–28.
3. Буков В.Н., Евгенов А.В., Шурман В.А. Управление функциональной избыточностью перспективных интегрированных комплексов бортового оборудования // Матер. засед. межвед. раб. групп. по подгот. предлож-й, направл. на выявл. перспект. и прорыв. направ. науч.-технич. и инновац. развития авиац. отрасли. М.: Студия Этника, 2018. С. 45–53.
4. Sollock P. Reconfigurable Redundancy – The Novel Concept Behind the World’s First Two-Fault-Tolerant Integrated Avionics System // Avionics, Navigation and Instrumentation. P. 243–246. URL: https://www.nasa.gov/centres/johnson/pdf/584731main_Wings-ch4e-pgs242-255.pdf.
5. Каляев И.А., Мельник Э.В. Реконфигурируемые информационно-управляющие системы // Матер. пленар. засед. 5-й Рос. мультikonф. по пробл. управл. СПб.: Изд. ЦНИИ Электроприбор, 2012. С. 36–37.
6. Агеев А.М., Бронников А.М., Буков В.Н., Гамаюнов И.Ф. Супервизорный метод управления технических систем с избыточностью // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 72–82.
7. Pouliezos A.D., Stavrakakis G.S. Real time fault monitoring of industrial processes. The Netherlands: Kluwer Acad. Publishers, 1994.
8. DO-297. Integrated modular avionics (IMA) development guidance and certification considerations. Washington: RTCA Inc., 2005.
9. ГОСТ Р 27.605-2013. Надежность в технике. Ремонтпригодность оборудования. Диагностическая проверка.
10. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения.
11. Amato F., Cosentino C., Mattei M., Paviglianiti G. A Direct/Functional Redundancy Scheme for Fault Detection and Isolation on an Aircraft // Aerospace Science and Technology. 2006. No. 10 (4). P. 338–345.
12. Isermann R., Ball’e P. Trends in the Application of Model-based Fault Detection and Diagnosis of Technical Processes // Control Eng. Pract. 1997. No. 5 (5). P. 709–719.
13. Marcos A., Balas G. A Robust Integrated Controller/Diagnosis Aircraft Application // Int. J. Robust Nonlin. Control. 2005. No. 15. P. 531–551.

14. *Чернодаров А.В.* Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов. М.: Научтехлитиздат, 2017.
15. Диагностика и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования. Уч. пос. для вузов гражд. авиации / Под ред. И.М. Синдеева. М.: Транспорт, 1984.
16. Основы технической диагностики. В 2-х кн. / Под ред. П.П. Пархоменко. М.: Энергия, 1976.
17. Машиностроение: Энци. Т. III-7. Измерения, контроль, испытания и диагностика / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1996.
18. *Долбня Н.А.* Встроенные средства контроля бортовой вычислительной системы под управлением операционной системы реального времени как итеративный агрегированный объект // Вестн. Самарского гос. аэрокосмич. ун-та. 2012. № 5(36). С. 224–228.
19. *Буков В.Н., Базанов А.П., Колодежский А.П., Максименко И.М., Шпилевой Ю.М.* Теоретические основы и средства автоматизированного контроля / Под общ. ред. В.Н. Букова. М.: Изд. ВВИА, 1997.
20. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
21. *Авакян А.А., Сучков В.Н., Искандеров Р.Д., Шурман В.А., Копнёнкова М.В., Вовчук Н.Г.* Способ и вычислительная система отказоустойчивой обработки информации критических функций летательных аппаратов. Патент RU 2413975 С2. Бюл. № 7 от 10.03.2011.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.Ф. Караваем.

Поступила в редакцию 17.01.2019

После доработки 04.07.2019

Принята к публикации 18.07.2019