

МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ В ЦЕЛЯХ УПРАВЛЕНИЯ ИХ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ.

Ч. 1. Встроенные средства контроля и разбиение на классы

В. Н. Буков*, А. М. Бронников**, А. С. Попов***, В. А. Шурман****

*АО «Бортовые аэронавигационные системы», г. Москва,

**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,

***ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж,

****АО «НИИ авиационного оборудования», г. Жуковский

*✉ v_bukov@mail.ru, **✉ bronnikov_a_m@mail.ru, ***✉ saga30@yandex.ru, ****✉ shurman@niiao.ru

Аннотация. Управление избыточностью технической системы предполагает использование процедуры мониторинга – контроля текущего состояния ее составных частей с целью реконfigurирования системы для обеспечения повышения эксплуатационных характеристик и автономности их применения. В обзоре, состоящем из четырех частей, приводятся современные методы мониторинга в интересах управления избыточностью. Первая часть обзора посвящена в основном анализу наиболее распространенных в современных технических системах методов мониторинга на основе схем голосования, правил достоверности, контрольных кодов, программного контроля, на использовании которых чаще всего основаны современные встроенные средства контроля. Наряду с ними здесь анализируются давно известные, но менее распространенные в технике методы мониторинга: диагностирование с разделением на классы, а также диагностирование на основе алгебраических инвариантов.

Ключевые слова: мониторинг технического состояния, управление избыточностью, диагностирование, встроенные средства контроля, контрольные коды, разбиение на классы, алгебраические инварианты.

ВВЕДЕНИЕ

Возросшие возможности информационного и математического обеспечения процессов управления сложными динамическими системами и комплексами оборудования позволяют принципиально по-новому подойти к удовлетворению постоянно ужесточаемых требований к их отказоустойчивости, в том числе на основе управляемой избыточности [1, 2]. Одной из задач управления избыточностью перспективных систем является выполнение процедуры мониторинга, т. е. слежения за текущими изменениями [3] готовности к функцио-

нированию составных частей таких систем [4, 5] с целью реконfigurирования последних по мере необходимости.

Мониторинг технического состояния объекта (ТСО) заключается в процессе наблюдения за ТСО на протяжении интервала времени жизни объекта (например, на протяжении полета воздушного судна) и базируется на определенной иерархии методов определения ТСО, т. е. технического диагностирования [6]. Согласно изложенному в работе [7] мониторинг является составной частью технического обслуживания.

Техническое диагностирование обычно представляет собой дискретную последовательность

технических диагнозов (результатов диагностирования, привязанных к определенным моментам времени) [6].

Диагностирование технического состояния технических систем является весьма сложной проблемой, требующей привлечения широкого спектра алгоритмических решений. Содержание задачи контроля (диагностирования) систем с инженерной точки зрения заключается в обнаружении (поиске) отказов по доступным для этой цели признакам.

С точки зрения перспектив развития данного направления наиболее сильных результатов в области мониторинга следует ожидать на позициях системного подхода¹, основанного прежде всего на триединстве таких ключевых направлений, как, во-первых, надежность и работоспособность, во-вторых, рациональность (ограничение привлекаемых ресурсов, существенных, например, для самопроверяемых схем [8]), и, в третьих, обоснованная глубина («зернистость») проектирования системы в целом, оптимизирующая баланс крупнофрагментарного и мелкофрагментарного разбиений системы на компоненты.

На рисунке показана классификация применяемых и в настоящее время развиваемых методов диагностирования динамических систем, где указаны не распространенные названия методов, а характеризующие их ключевые слова. Штриховая связь указывает на то обстоятельство, что, с одной стороны, тестовый и функциональный контроль имеют много общего в применяемых методах и процедурах, а с другой стороны, обладают и характерными особенностями, не раскрываемыми в данном обзоре.

Далее кратко изложены положения основных подходов к задаче диагностирования отказов компонентов авиационных комплексов бортового оборудования (КБО). Обзор не претендует на полноту. Он содержит заявку на системность, отражает точку зрения авторов и призван проиллюстрировать возможности, типовые ограничения распространенных подходов и тенденции их развития. Изложение ведется в порядке от наиболее простых (очевидных) методов к все более сложным, требующим от разработчика владения специальным математическим аппаратом.



Классификация методов диагностирования

¹ Этот тезис предложен одним из рецензентов статьи, за что авторы выражают искреннюю благодарность. Вместе с тем научное обоснование и раскрытие соответствующих позиций является предметом отдельной публикации.



1. МОНИТОРИНГ НА ОСНОВЕ ВСТРОЕННЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ

Встроенные средства контроля (ВСК) [9, 10] относятся к наиболее распространенным современным решениям обеспечения требуемого уровня отказобезопасности различных технических систем. В системах же повышенной опасности, к которым, в частности, относятся авиационные КБО, встроенный контроль внедряется во все составляющие компоненты (системы, подсистемы, узлы, модули и даже микросхемы).

ВСК представляют собой совокупность аппаратных или программных компонентов, специально вводимых в состав систем или комплектующих изделий, функциональных узлов (ФУз). Они, как правило, не участвуют в работе функциональных модулей (ФМ) системы или ее ФУз по назначению, а собирают и обобщают различные данные, объективно отражающие, по мнению разработчика, работоспособность этих модулей. В перспективе ВСК могут быть основаны на применении различных методов мониторинга и их сочетаний, освещаемых во всех четырех частях обзора. Здесь ограничимся рассмотрением наиболее распространенных подходов, нашедших широкую реализацию в современных ВСК.

Применяются два различных подхода к организации работы ВСК: тестовый и функциональный контроль.

1.1. Тестовый контроль

При тестовом контроле [11, 12] проверку узлов, устройств и системы в целом осуществляют с помощью специального оборудования – генераторов тестовых воздействий и анализаторов выходных реакций. Необходимость в дополнительном оборудовании и сложность совмещения с нормальным функционированием ограничивают применение тестовых методов исключительно периодами, когда объект контроля не используется по прямому назначению.

В бортовых условиях тестирование осуществляется с использованием специализированных тестов встроенного контроля (ТВК) в фоновом режиме во время специальных интервалов (слотов), выделяемых операционной системой реального времени. Содержание ТВК – сравнение результатов обращения (записи и чтения) к программно-доступным ресурсам вычислителя, включая специально организованные контрольные тракты.

Тестирование с имитацией штатных воздействий осуществляется специальным генератором

тестов, выходные реакции сравниваются с эталонными при помощи анализатора.

Вероятностное тестирование основано на использовании тестового генератора псевдослучайных воздействий и статистической обработки выходных данных со сравнением результатов с эталонными, полученными предварительно.

Тестирование с подсчетом числа переключений предполагает генерирование последовательности тестовых наборов сигналов на входе схемы и подсчет переключений на ее выходе, результат сравнивается с эталонным.

При *сигнатурном тестировании* стимуляция объекта контроля осуществляется с помощью генератора псевдослучайных воздействий, а выходные реакции сжимаются посредством сигнатурного анализатора; полученные сигнатуры сравниваются с эталонными.

1.2. Функциональный контроль

Функциональный контроль производится в процессе функционирования объекта контроля по назначению, и его реализация базируется обычно на применении двух основных принципов: схем голосования и правил достоверности.

Принципиальной особенностью *схем сравнения (голосования)* является одновременное использование нескольких одинаковых по назначению и исполнению технических устройств (подсистем, узлов, модулей). Система же диагностирования сводится к средствам, осуществляющим сравнение данных этих систем и выбор предпочтения по заданному правилу сопоставления их выходов. Распространенным вариантом являются так называемые кворум-элементы (КЭ), выделяющие неисправные модули на основе обработки результатов голосования нескольких подключенных ФМ. Суждение о работоспособности ФМ выносится на основе значительного (наибольшего или превышающего пороговое значение) отклонения его выхода от других однотипных модулей [13–15].

Основные особенности метода кворумирования включают:

- предположение о неизменности технического состояния ФМ в пределах цикла;
- предположение о том, что КЭ может быть только исправным²;
- применимость к числу ФМ, превышающему 2 (при двух ФМ объектом оценки работоспособно-

² Речь идет о концептуальном решении, однако известны многоуровневые схемы мажорирования, которые сдвигают это ограничение на более высокие уровни сравнения результатов сравнения.

сти становится пара ФМ, а не каждый ФМ в отдельности);

- предположение о том, что с учетом правил голосования (равноправное, взвешенное, с дискриминациями и пр.) исправные ФМ внутри каждого цикла доминируют над неисправными и реализована возможность отключения неисправных;

- общий поток данных для всех ФМ.

Своеобразная форма сравнения широко реализуется в так называемых самопроверяемых системах [8], в которых совокупность однотипных модулей, подверженных одинаковым входным воздействиям, разбивается на пары, и выходы внутри каждой пары сравниваются между собой. Пара с совпадающими выходами считается работоспособной, в противном случае оба модуля пары полагаются неработоспособными.

Принципиальной особенностью систем, использующих *правила достоверности (ПД)*, является наличие диагностируемого устройства в единственном числе. В зависимости от конкретных условий и решений в качестве правил достоверности могут выступать: сравнение с эталонными (электронными) моделями, фиксирование нарушений заданных временных и (или) параметрических интервалов (контроль по допуску на параметр [13]), проверка логических и др. соотношений, вычисление инвариантов разных порядков и пр.

Основные особенности метода использования ПД:

- в пределах цикла работоспособность ФМ не изменяется;

- предполагается, что элемент, реализующий ПД, может быть только работоспособным, в том числе при наличии эталонной модели она может быть только работоспособной;

- применимость к любому числу ФМ;

- предполагается, что входные и выходные данные в достаточной степени информативны;

- каждый ФМ имеет свой поток данных.

Несколько особняком стоит недавно возникшее направление [16], которое можно назвать мониторингом ФМ по его эксплуатационным данным с записью условий применения. Подразумевается, что непосредственно с ФМ конструктивно и функционально связан специальный элемент (чип), собирающий и накапливающий данные об условиях его использования и хранения. В число параметров, хранимых и выдаваемых таким чипом в модуль мониторинга, 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 модуль мониторинга возлагается анализ поступающих данных и формирование на основе этого анализа суждения о возможной работоспособности ФМ.

1.3. Преимущества и условия использования встроенных средств контроля

Можно отметить в разной степени распространенные особенности (ограничения) ВСК:

- наличие слабых³ предположений о неизменности работоспособности проверяемых устройств внутри цикла мониторинга;

- наличие сильных⁴ предположений о работоспособности систем контроля или их основных устройств,

- ограничение минимального или требование большого числа ФМ для случая кворумирования (мажоритарного контроля),

- требование доминирования работоспособных ФМ над неработоспособными,

- возможность оперативного отключения неисправных ФМ,

- требование информативности процессов в ФМ⁵.

Основное же преимущество непосредственного использования ВСК (как есть) для мониторинга компонентов в избыточном КБО заключается в отлаженности технологий их создания и практического применения.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КОДОВ

Специфическим направлением в рамках общей задачи встроенного контроля цифровой техники является использование контрольных кодов для обнаружения и исправления ошибок в цифровых данных [11, 17–23].

Наибольшее распространение получили блочные коды, у которых последовательность символов

³ Удовлетворение предположения не влияет на практическое применение подхода.

⁴ Удовлетворение предположения значительно сужает прикладные возможности подхода.

⁵ Необходимость такого требования иллюстрируется в ч. 3 обзора.



на выходе источника разбивается на блоки (код-овые слова, кодовые комбинации), содержащие одинаковое число символов. Любой код способен обнаруживать и исправлять ошибки (является помехоустойчивым), если не все кодовые слова этого кода используются для передачи информации [24], иначе говоря, помехоустойчивый код должен быть избыточным. Тем не менее различают два вида помехоустойчивых кодов: коды с обнаружением ошибок и коды с исправлением ошибок (корректирующие коды).

Сущность обнаружения ошибки связана с обнаружением превращения полученного или считанного (разрешенного) кодового слова в так называемое запрещенное. При этом ошибки, связанные с его превращением в другое разрешенное кодовое слово, не обнаруживаются.

Исправление ошибок представляет собой более сложную операцию, и для ее выполнения все запрещенные кодовые слова разбиваются на непересекающиеся подмножества, каждое из которых приписывается одному из разрешенных кодовых слов. Таким образом, принадлежность возникшего запрещенного кодового слова какому-либо подмножеству истолковывается как соответствующее разрешенное кодовое слово. Если же возникшее запрещенное кодовое слово не принадлежит ни одному из подмножеств, то ошибка обнаруживается, но не исправляется.

Свойства кодов по обнаружению и исправлению ошибок характеризуются коэффициентами обнаружения ($K_{об}$) и исправления ($K_{ис}$), имеющими вероятностную природу. При этом всегда $K_{об} > K_{ис}$.

К обнаруживающим относятся, например, следующие распространенные коды.

Код с контролем по запрещенным комбинациям заключается в обнаружении комбинаций значений разрядов в кодовом слове, объявленных недопустимыми (например, обращение к несуществующему адресу).

Код с проверкой четности может рассматриваться как частный случай кода с контролем по запрещенным комбинациям и образуется путем добавления к информационным разрядам, хранящим кодовое слово, одного неинформационного разряда (свертки по mod2, дополнения количества единиц в коде до нечетности, проверяемой при каждом обмене между регистрами). Код с проверкой четности прост в технической реализации, позволяет обнаруживать ошибки нечетной кратности.

Итеративные коды относятся к классу кодов произведения и могут быть представлены в виде

прямоугольных матриц или таблиц (могут строиться на основе матриц и более высоких размерностей); при этом информационные символы, записываемые по строкам и столбцам, могут кодироваться либо одним типом помехоустойчивого кода, либо разными.

В частном случае итеративные коды представляют собой развитие кода проверки четности в том смысле, что применяются для отдельной проверки четности по строкам, столбцам и другим структурам хранимых и передаваемых массивов данных. Такие коды отличаются простотой и эффективностью обнаружения многократных ошибок. В качестве иллюстрации представлен принцип контроля двумерного матричного массива, включающий проверку четности по строкам, столбцам и главной диагонали [22]:

1	0	1	1	1	$\text{чет}_{1j}=0$
0	0	1	0	1	$\text{чет}_{2j}=0$
1	1	1	0	0	$\text{чет}_{3j}=1$
0	1	0	0	1	$\text{чет}_{4j}=0$
1	1	1	0	1	$\text{чет}_{5j}=0$
$\text{чет}_{i1}=1$	$\text{чет}_{i2}=1$	$\text{чет}_{i3}=0$	$\text{чет}_{i4}=1$	$\text{чет}_{i5}=0$	$\text{чет}_{ii}=1$

Корреляционные коды предусматривают введение дополнительного контрольного разряда для каждого информационного разряда слова таким образом, что исходному информационному значению «0» соответствует запись «01», а значению «1» – запись «10». При этом коды «00» и «11» являются признаками искажения данных.

DS-кодирование [23] представляет собой разновидность применения корреляционных кодов и реализуется посредством двух параллельных каналов последовательной передачи кода. Если в основном канале D происходит изменение разряда с 0 на 1 или с 1 на 0, то в контрольном канале S не происходит смены значения. И наоборот, если в канале D нет изменения, то в канале S происходит изменение с 0 на 1 или с 1 на 0. Приемник информации контролирует отсутствие одновременной смены или неизменности значений разрядов в обоих каналах. Если это условие нарушается, фиксируется наличие ошибки передачи данных. Данный тип кодирования отличается минимальной задержкой обнаружения ошибки (один такт).

Код с простым повторением предусматривает повторную передачу кодовых слов, совпадение которых принимается в качестве подтверждения отсутствия ошибки. В противном случае принимается решение о наличии ошибок.

Инверсный код является модификацией кода с простым повторением, заключающейся в том, что в случае нечетного числа единиц в исходном слове к нему добавляется его инверсия. Прием инверсного кода осуществляется в два этапа. На первом этапе суммируются единицы в основном слове. Если число единиц четное, то контрольные разряды принимаются без изменения, если нечетное, то контрольные разряды инвертируются. На втором этапе контрольные и информационные разряды суммируются по модулю два. Нулевая сумма говорит об отсутствии ошибок. При ненулевой сумме принятое слово бракуется.

Равновесные коды относятся к простейшим блочным кодам и представляют собой коды, разрешенные слова которых содержат фиксированное число единиц. Используются в основном при передаче данных по каналам связи.

Каскадное кодирование. Преимущества разных способов кодирования можно объединить, применив каскадное кодирование. При этом информация сначала кодируется одним кодом, а затем другим, в результате получается *код-произведение*.

К корректирующим кодам относятся, в частности, следующие.

Код Хэмминга – один из наиболее широко известных классов линейных кодов [17, 20, 24, 25]. Он конструируется следующим образом: разряды с номерами, представляющими собой степень двойки, являются контрольными, остальные – информационными. Обычно поступают таким образом: исходя из числа контрольных разрядов, определяют максимально возможное число информационных. Кодов Хэмминга с одним контрольным разрядом не существует, код Хэмминга с двумя контрольными разрядами содержит один информационный разряд и т. д. Результативность достигается путем многократной проверки принятой комбинации на четность. Каждая проверка должна охватывать часть информационных разрядов и один из избыточных. При передаче (записи в память) данных формируются и записываются значения контрольных разрядов, а при приеме (чтении) этих данных контрольные разряды вновь формируются и сопоставляются с исходными. Если все вновь вычисленные контрольные разряды совпадают с полученными, то сообщение не содержит ошибок. В противном случае выводится сообщение об ошибке, и, если представляется такая возможность, ошибка исправляется.

В *сверточных кодах* [26] формирование контрольных разрядов производится на основе нескольких информационных слов, а декодирование – на основе нескольких кодовых слов. Принцип работы сверточных кодов можно сопоставить с

исправлением ошибок по смыслу. Сверточные коды называют также решетчатыми или трилистными.

В *циклических кодах* [17–19] в результате циклической перестановки любого кодового слова, содержащего как информационные, так и контрольные разряды, получается слово, принадлежащее этому же циклическому коду. При построении циклических кодов используют формализм операций над многочленами: многочлены, соответствующие принятым кодовым словам, должны делиться на их порождающий без остатка. Наличие остатка свидетельствует об ошибке. Если число ошибок не превышает расчетную величину, то остаток от деления зависит от конфигурации ошибок и может быть использован для их исправления. Использование циклических кодов позволяет упростить схемную реализацию кодирующих и декодирующих устройств путем использования сдвиговых регистров.

3. ПРОГРАММНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ АЛГОРИТМА

К достоинствам программных средств относятся универсальность, гибкость и относительно невысокая стоимость. В то же время для их реализации требуются специфические пакеты программного обеспечения.

Контроль методом *многократного счета* предполагает, что решение соответствующей задачи выполняется два или более раз. В простейшем случае совпадение результатов считается признаком правильности решения задачи. При более глубоком подходе могут использоваться различные алгоритмы обработки результатов, включая варианты голосования (мажорированные оценки). Требуются дополнительные объемы памяти и времени счета.

Контроль по методу *усеченного алгоритма* призван снизить затраты многократного счета и применим в случаях, когда у решаемой задачи может существовать упрощенный (сокращенный) алгоритмический вариант, позволяющий сформировать пусть менее точный, но содержательно близкий результат. Такой вариант может не устраивать заказчика в качестве решения поставленной задачи, но вполне приемлем для оценки правильности функционирования полного алгоритма.

*Метод проверки предельных значений*⁶. Применим в задачах, допускающих априорное оценивание допустимых диапазонов искомого решения.

⁶ Разновидность контроля по допуску на параметр [12].



Часто такие диапазоны определяются для отдельных контрольных точек (мест в последовательности действий, составляющих алгоритм). Этот метод можно считать вариантом усеченного алгоритма в случае, когда с его помощью вычисляются границы возможных решений.

Способ подстановки. Если проверяемый алгоритм осуществляет решение математических уравнений, то традиционно эффективным способом проверки решения является подстановка полученного решения в исходные уравнения. Приемлемая малость невязки (различия левых и правых частей) уравнений позволяет судить о правильности полученного решения. В отличие от многократного счета подстановка позволяет выявить систематические (внесенные при программировании) ошибки. Кроме того, подстановка, как правило, менее трудоемка по сравнению с многократным счетом.

Метод обратного счета. В некоторых задачах возможно определение исходных данных по полученному результату. Тогда проверка правильности счета может быть выполнена использованием данной возможности. При этом затраты иногда могут оказаться меньше затрат на прямой счет.

Проверка с помощью *дополнительных связей*. Такой метод предполагает возможность введения связей между различными параметрами основной задачи, описываемых точными или статистическими соотношениями. Вообще говоря, он является упрощенной версией аналитических методов: метода инвариантов и метода избыточных переменных, излагаемого в ч. 2 обзора.

Метод контрольных сумм заключается в суммировании всех слов обрабатываемого массива (команды, данные) с последующим сохранением суммы в определенной части массива. В интересах контроля выполняют повторное суммирование и сравнение с сохраненной контрольной суммой. Применяется в основном при передаче (загрузке) данных и программ.

Метод счета записей подразумевает подсчитывание и запоминание выполняемых записей, т. е. точно установленных наборов данных. В дальнейшем при работе с данными подсчет повторяется и результат сравнивается с первоначальным. Позволяет обнаружить потерю или пропуск обработки данных.

Контроль маркерных импульсов позволяет отследить прохождение вычислительным процессом определенных позиций или завершение счета в целом. Генерация соответствующих меток времени (маркеров) должна быть предусмотрена в реализуемом алгоритме. В случае нарушения предписанной последовательности маркеров или завышенного времени их ожидания счет прерывается и

принимается решение о дальнейших действиях (повторное вычисление, использование резервных вариантов, останов задачи).

Специфическим частным случаем маркерного метода можно полагать многократную (от трех до пяти раз) отправку *запроса на получение данных*. Ошибка фиксируется при отсутствии отклика на все отправленные запросы. В случае получения ответа на любой из запросов процесс передачи⁷ данных считается безотказным.

Контроль последовательности выполнения команд и программных модулей осуществляется путем разбиения программ на участки. Затем применяются один из способов:

- для каждого участка вычисляется свертка (путем счета числа операторов, методом сигнатурного анализа, использованием кодов), которая сравнивается с заранее рассчитанной;

- каждому участку присваивается определенное кодовое слово (ключ участка), которое записывается в выбранную ячейку ОЗУ перед началом выполнения участка и проверяется при окончании участка. Узлы разветвляющихся программ проверяются с помощью ключей, а циклических участков – числом повторений цикла.

Излагаемые далее методы диагностирования, в отличие от описанных выше эвристических, опираются на относительно более глубокий математический анализ диагностируемой системы.

4. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ С РАЗБИЕНИЕМ НА КЛАССЫ

Математическую постановку задача контроля получила в работе [27], где осуществлялся поиск неисправностей в электрической схеме. Основным элементом постановки задачи явилась прямоугольная таблица неисправностей, содержащая S строк-признаков и D столбцов-состояний. Далее фиксировалось некоторое подмножество столбцов R_D . Если R_D – разбиение множества столбцов-состояний на классы⁸, то формально задача заключалась в определении такого разбиения R_S на множестве строк-признаков, чтобы выполнялось взаимно однозначное соответствие

$$R_D \Leftrightarrow R_S. \quad (1)$$

Содержание условия (1) интуитивно ясно: на элементах из множества D в виде теста строится хотя бы один элемент из R_D с последующим при-

⁷ Достоверность данных контролируется отдельно.

⁸ По определению классы либо не пересекаются, либо совпадают полностью.

своением ему, в силу импликации «тогда и только тогда», элемента из R_S .

Получили распространение различные модификации такого подхода [28].

В основе методов этого подхода лежит модель диагностируемого объекта в виде таблицы функций неисправности R_j^i (в общем виде она приведена ниже). Здесь D – множество технических состояний объекта; $d_0 \in D$ – его безотказное (исправное) состояние; $d_i \in D$, $i = \overline{1, n}$, – отказные (неисправные) состояния. Каждому неисправному состоянию соответствует определенный отказ (дефект) $s_i \in S$ и наоборот.

Функции неисправностей

R		D				
		d_0	...	d_i	...	d_n
S	s_1	R_1^0	...	R_1^i	...	R_1^n
	$\vdots$	...	...	...	...	...
	s_j	R_j^0	...	R_j^i	...	R_j^n
	$\vdots$	...	...	...	...	...
	s_k	R_k^0	...	R_k^i	...	R_k^n

В приведенной таблице S – множество признаков, $s_j \in S$, $j = \overline{1, k}$; R_j^i – функция неисправности, которая кратко записывается формулой

$$R_j^i = \Psi^i(s_j) \quad (2)$$

и является аналитической, графической, табличной или другой формой представления поведения системы. Более подробная запись включает входные и выходные сигналы, перечни элементарных проверок, а также начальные условия, если объект динамический [28].

Общая запись (2) может быть детализирована в свете достижения желаемой глубины диагностирования. Часто явную запись (2) используют только для безотказного состояния R_j^0 , относительно которого описывают отказные состояния.

При этом предполагается, что все отказы обладают свойствами обнаруживаемости и различения, т. е. все отказы могут быть однозначно определены и сепарированы от других отказов посредством некоторой совокупности элементарных проверок Π . В этом случае простым перебором элементарных проверок $\pi_k \in \Pi$ можно разбить таблицу не-

исправностей на непересекающиеся подмножества D_v , $v = \overline{1, \lambda}$:

$$\bigcup_{v=1}^{\lambda} D_v = D, \quad D_v \cap D_\mu = \emptyset, \quad v \neq \mu. \quad (3)$$

Таблицы отказов используются для построения как алгоритмов диагностирования, так и физической модели объекта, обеспечивающей реализацию схем диагностирования.

По одной и той же таблице функций неисправностей и при заданном разбиении множества D на подмножества D_v можно построить в общем случае несколько полных избыточных тестов $T \subset \Pi$ (совокупностей элементарных проверок π). Содержание многих решений данного подхода связано с минимизацией числа элементарных проверок. Для этого используются различные инструменты: разделение задач диагностирования на прямые (определение технического состояния d_i по заданной элементарной проверке π_k) и обратные (определение множества проверок $\{\pi_k\}$, различающих заданную пару отказов d_m и d_n), построение деревьев отказов, расщепление входов и выходов и пр.

5. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ ИНВАРИАНТОВ

Контроль с вычислением алгебраических инвариантов [28] относится к аналитическим методам, поскольку использует аналитическую информацию (математическое описание) о функционировании объекта контроля. Такой контроль заключается в проверке некоторых алгебраических соотношений (контрольных условий), которым должна удовлетворять совокупность выходных сигналов объекта, дополненная при необходимости одним или несколькими избыточными сигналами. Инвариантность контрольных условий состоит в том, что при отсутствии отказов они обязаны выполняться для любых входных сигналов и в любой момент времени.

Вкратце устройство диагностирования работает следующим образом. На устройство поступают входные U и выходные Y сигналы проверяемого объекта. На их основе вырабатываются вспомогательные сигналы Z , удовлетворяющие совместно с сигналами Y алгебраическому уравнению, разрешенному относительно переменной Δ , называемой синдромом:

$$\Delta = \Phi(Y, Z) = 0. \quad (4)$$



Синдром инвариантен по отношению к вектору входных сигналов U . Если условие (4) нарушается, т. е. если $\Delta \neq 0$, то выносится суждение о возникновении отказа. Практически из-за наличия допустимых погрешностей измерений и вычислений контрольное условие (4) выполняется приближенно и диагностирование производится по неравенству $|\Delta| \leq \varepsilon$, где ε – допуск на выходной сигнал устройства диагностирования. Объекты, обладающие такими алгебраическими инвариантами, называются объектами с естественной избыточностью. Примерами здесь могут служить объекты, которые в безотказном состоянии обязаны двигаться по определенной, в частности фазовой, траектории (на сфере, в плоскости и пр.). Достоинством таких систем является минимум необходимой априорной информации об объекте и дополнительных средств диагностирования. Большинство же схем обнаружения отказов обладают искусственно созданной избыточностью.

Проанализируем чувствительность синдрома (4) к отказам. Пусть синдром представляет собой m -мерный вектор $\Delta = [\Delta_1 \ \dots \ \Delta_m]^T$, а возможные отказы объекта формализуются n -мерным вектором $F = [f_1 \ \dots \ f_n]^T$. При этом уравнение (4) следует переписать в виде

$$\Delta = \Phi(Y, Z, F) = 0. \quad (5)$$

Очевидно, что для проявления реакции синдрома Δ на единичный отказ $f_i \neq 0$ достаточно выполнения условия ненулевой чувствительности

$$\exists j: \frac{\partial \Phi_j}{\partial f_i} \neq 0,$$

которое удовлетворяется конструктивными решениями. В случае же множественного отказа, когда одновременно присутствуют несколько отказов f_i , требуется выполнение дополнительного условия невозможности взаимной компенсации (5) эффектов этих отказов

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial \Phi_1}{\partial f_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \Phi_m}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial \Phi_m}{\partial f_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \neq 0,$$

откуда видно, что при $m = n$ и максимальном ранге матрицы Якоби все одновременные формализованные отказы f_i обнаруживаются. Если же число m компонент Δ_j синдрома меньше числа n формализованных отказов f_i , возможна взаимная компенсация эффектов отказов и как результат – их пропуск.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен вариант классификации методов диагностирования и описаны содержание и особенности встроенных средств контроля. Рассмотрены инженерные эвристические методы мониторинга. Кратко охарактеризованы варианты мониторинга на основе схем голосования, правил достоверности, контрольных кодов, программных средств функционального контроля, таблиц неисправностей, а также алгебраических инвариантов. Во второй части обзора будут рассмотрены методы диагностирования, основанные на классическом моделировании отказов диагностируемой системы. В третьей части работы будут изложены методы диагностирования, основанные на нейронных сетях, нечетких и структурных моделях и моделях в виде множеств. Четвертая часть посвящена новым подходам к диагностированию и объединению различных моделей и методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буков В.Н., Бронников А.М., Агеев А.М. и др. Концепция управляемой избыточности комплексов бортового оборудования // Науч. чтения по авиации, посвящ. пам. Н.Е. Жуковского: Матер. XVI Всерос. науч.-практ. конф. – Москва, 2019. – С. 17–33. [Bukov, V. N., Bronnikov, A.M., Ageev, A.M., et al. Concept of controlled redundancy of on-board equipment complexes // Scientific readings on aviation, dedicated to the memory of N.E. Zhukovsky: Proc. of the XVI All-Russian scientific and practical conf. – Moscow, 2019. – P. 17–33. (In Russian)]
2. Буков В.Н., Агеев А.М., Евгенов А.В., Шурман В.А. Управление избыточностью технических систем. Супервизорный способ управления конфигурациями. – М.: ИНФРА-М, 2023. [Bukov, V.N., Ageev, A.M., Evgenov, A.V., Shurman, V.A. Redundancy management of technical systems. Supervisory method of configuration management. – M.: INFRA-M, 2023. (In Russian)]
3. Большая российская энциклопедия 2004–2017. – URL: <https://old.bigenc.ru/economics/text/2227291?ysclid=lt6tp1tio4782244915> (дата обращения 29.02.2024). [The Great Russian Encyclopedia 2004–2017. – URL: <https://old.bigenc.ru/economics/text/2227291?ysclid=lt6tp1tio4782244915> (accessed February 29, 2024). (In Russian)]
4. Pouliezios, A.D., Stavrakakis, G.S. Real time fault monitoring of industrial processes. – Dordrecht: Kluwer Acad. Publishers, 1994.
5. DO-297. Integrated modular avionics (IMA) development guidance and certification considerations. – Washington: RTCA Inc., 2005.
6. Науменко А.П. Теория и методы мониторинга и диагностики: Материалы лекций. – Омск: ОмГТУ, 2017. [Naumenko, A.P. Theory and methods of monitoring and diagnostics: Lecture materials. – Omsk: OmskGTU, 2017. (In Russian)]
7. ГОСТ Р 27.605–2013. Надежность в технике. Ремонтопригодность оборудования. Диагностическая проверка. – М.: Стандартинформ, 2014. – 28 с. [GOST R 27.605–2013. Reli-

- ability in engineering. Equipment maintainability. Diagnostic testing. – Moscow: Standartinform, 2014. – 28 p. (In Russian)]
8. Согомонян Е.С., Слабаков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. – Москва: Радио и связь, 1989. [Sogomonyan, E.S., Slabakov, E.V. Self-checking devices and fault-tolerant systems. – Moscow: Radio and Communications, 1989. (In Russian)]
 9. ГОСТ Р 56079-2014. Изделия авиационной техники. Безопасность полета, надежность, контролепригодность, эксплуатационная и ремонтная технологичность. Номенклатура показателей. – М.: Стандартинформ, 2014. [GOST R 56079-2014. Aircraft items. Flight safety, reliability, testability and maintainability indices. Indices nomenclature. – Moscow: Standartinform, 2014. (In Russian.)]
 10. Долбня Н.А. Встроенные средства контроля бортовой вычислительной системы под управлением операционной системы реального времени как итеративный агрегированный объект // Вест. Самарского гос. аэрокосмич. ун-та. – 2012. – № 5 (36). – С. 224–228. [Dolbnya, N.A. Built-in means of control of the on-board computing system under the control of the real-time operating system as an iterative aggregated object // Bulletin of the Samara State Aerospace University. – 2012. – No. 5 (36). – P. 224–228. (In Russian)]
 11. Arikan, E. Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels // IEEE Transactions on Information Theory. – 2009. – Vol. 55, no. 7. – P. 3051–3073.
 12. Бугаева А.А., Денисенко В.В. Процесс тестирования, методы и типы тестирования программного обеспечения // Синергия Наук. – 2022. – № 72. – С. 92–102. [Bugayeva, A.A., Denisenko, V.V. Protess testirovaniya, metody i tiry testirovaniya programmnogo obespecheniya // Sinergiya Nauk. – 2022. – No. 72. – S. 92–102. (In Russian)]
 13. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования: уч. пособ. для вузов гражд. авиации / под ред. И. М. Синдеева. – М.: Транспорт, 1984. [Diagnostics and forecasting of the technical condition of aviation equipment: teaching aid for civil aviation universities / Ed. by I. M. Sindeev. – Moscow: Transport, 1984. (In Russian)]
 14. Земляный Е.С., Тектов М.В. Кворум-элемент для определения параметрического отказа курсовертикалей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 6. – С. 104–109. [Zemlyanyy, E.S., Tektov, M.V. Quorum element for determining the parametric failure of heading and vertical reference systems // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. – 2023. – No. 6. – P. 104–109. (In Russian)]
 15. Савина М.Г., Мусонов В.М., Худонов В.П., Сеславин В.С. Применение кворум-элементов для контроля однотипных датчиков // Решетневские чтения. – 2013. – Т. 1. – С. 377–379. [Savina, M.G., Musonov, V.M., Khudonogov, V.P., Seslavin, V.S. Application of quorum elements for monitoring similar sensors // Reshetnev readings. – 2013. – Vol. 1. – P. 377–379. (In Russian)]
 16. Джанджгава Г.И., Дядищев А.В., Гарифов Р.Ш. О концепции мониторинга технического состояния изделий авионики на основе применения средств и методов физической диагностики // Идеи и новации. – 2018. – Т. 6, № 3. – С. 64–68. [Dzhandzhgava, G.I., Dyadishchev, A.V., Garifov, R.Sh. On the concept of monitoring the technical condition of avionics products based on the use of physical diagnostics tools and methods // Ideas and Innovations. – 2018. – Vol. 6, No. 3. – P. 64–68. (In Russian)]
 17. Кудряшов Б.Д. Основы теории кодирования: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. [Kudryashov, B.D. Fundamentals of coding theory: textbook. – St. Petersburg: BKhV-Petersburg, 2016. (In Russian)]
 18. Тельпухов Д.В., Деменева А.И., Жукова Т.Д., Хрущев Н.С. Исследование и разработка систем автоматизированного проектирования схем функционального контроля комбинационных логических устройств // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. – 2018. – № 1 (169). – С. 15–22. [Telpukhov, D.V., Demeneva, A.I., Zhukova, T.D., Khrushchev, N.S. Research and development of automated design systems for functional control circuits of combinational logic devices // Electronic engineering. Series 3: Microelectronics. – 2018. – No. 1 (169). – P. 15–22. (In Russian)]
 19. Mytsko, E.A., Osokin, A.N., Malchukov, A.N. CRC checksum. A study of CRC checksum calculation algorithms. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co KG, 2013. – 180 p.
 20. Павлов А.А., Царьков А.Н., Сорокин Д.Е. и др. Анализ эффективности тестово-кодовой коррекции ошибок оперативных запоминающих устройств // Известия Института инженерной физики. – 2015. – № 4 (38). – С. 47–57. [Pavlov, A.A., Tsarkov, A.N., Sorokin, D.E., et al. Analysis of the efficiency of test-code error correction of random access memory devices // Bulletin of the Institute of Engineering Physics. – 2015. – No. 4 (38). – P. 47–57. (In Russian)]
 21. Селиванов Е.П., Митин Д.Д. Вариант методики построения помехоустойчивого кода Хемминга // Современные информационные технологии. – 2006. – № 3. – С. 34–37. [Selivanov, E.P., Mitin, D.D. A variant of the method for constructing a noise-resistant Hamming code // Modern information technologies. – 2006. – No. 3. – P. 34–37. (In Russian)]
 22. Павлов А.А., Царьков А.Н., Романенко А.Ю., Михеев А.А. Метод коррекции ошибок в устройствах передачи и переработки информации систем телекоммуникаций при воздействии внешних и внутренних помех // Авиакосмическое приборостроение. – 2021. – № 8. – С. 13–24. [Pavlov, A.A., Tsarkov, A.N., Romanenko, A.Yu., Mikheev, A.A. Metod korrektsii oshibok v ustroystvakh peredachi i pererabotki informatsii sistem telekommunikatsii pri vozdeystvii vneshnikh i vnutrennikh pomekh // Aviakosmicheskoe priborostroenie. – 2021. – No. 8. – S. 13–24. (In Russian)]
 23. ГОСТ Р 70020-2022 Космическая техника. Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов. SpaceWire-RUS. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 118 с. [GOST R 70020-2022 Kosmicheskaya tekhnika. Interfeisy i protokoly vysokoskorostnogo mezhpribornogo informatsionnogo obmena i kompleksirovaniya bortovykh sistem kosmicheskikh apparatov. SpaceWire-RUS. – Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii, 2022. – 118 s. (In Russian)]
 24. Asokan, R., Vijayakumar, T. Design of extended hamming code technique encryption for audio signals by double code error prediction // Information Technology and Digital World. – 2021. – Vol. 3, no. 3. – P. 179–192.
 25. Bae, W., Han, J.W., Yoon, K.J. In-memory hamming error-correcting code in mersister crossbar // IEEE Trans. on Electron. Devices. – 2022. – Vol. 69, no. 7. – P. 3700–3707.



26. Журавлев В.Г., Куранова Н.Ю., Евсеева Ю.Ю. Помехоустойчивые коды: учебное пособие. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2013. [Zhuravlev, V.G., Kuranova, N.Yu., Evseeva, Yu.Yu. Noise-immune codes: a tutorial. – Vladimir: VISU Publishing House, 2013. (In Russian)]
27. Чегис И.А., Яблонский С.В. Логические способы контроля работы электрических схем // Тр. МИАН СССР. – 1958. – Т. 51. – С. 270–360. [Chegis, I.A., Yablonsky, S.V. Logical methods for monitoring the operation of electrical circuits // Proceedings of the Steklov Mathematical Institute of the USSR. – 1958. – Vol. 51. – P. 270–360. (In Russian)]
28. Основы технической диагностики. В 2-х кн. / Под ред. П. П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. [Fundamentals of technical diagnostics. In 2 books. / Ed. by P.P. Parkhomenko. – M.: Energy, 1976. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Лебедевым.

Поступила в редакцию 10.11.2024,
после доработки 26.03.2025.
Принята к публикации 10.04.2025.

Буков Валентин Николаевич – д-р техн. наук, АО «Бортовые аэронавигационные системы», г. Москва,
✉ v_bukov@mail.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5194-8251>

Бронников Андрей Михайлович – д-р техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ✉ bronnikov_a_m@mail.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0009-1216-3521>

Попов Александр Сергеевич – канд. техн. наук, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, ✉ saga30@yandex.ru,

Шурман Владимир Александрович – АО «НИИ авиационного оборудования», г. Жуковский, ✉ shurman@niiao.ru

© 2025 г. Буков В. Н., Бронников А. М., Попов А. С., Шурман В. А.



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

TECHNICAL CONDITION MONITORING METHODS TO MANAGE THE REDUNDANCY OF SYSTEMS. PART I: Built-in Control and Partition into Classes

V. N. Bukov*, A. M. Bronnikov**, A. S. Popov***, and V. A. Shurman****

*Airborne Aeronautical Systems, Moscow, Russia

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

***Zhukovsky–Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

****Institute of Aircraft Equipment, Zhukovsky, Russia

*✉ v_bukov@mail.ru, **✉ bronnikov_a_m@mail.ru, ***✉ saga30@yandex.ru, ****✉ shurman@niiao.ru

Abstract. Redundancy management of a technical system involves a monitoring procedure (control of the current state of its components) to reconfigure the system and improve the performance and autonomy of its application. This paper initiates a four-part survey of the state-of-the-art monitoring methods for redundancy management. Part I is mainly devoted to the analysis of voting schemes, fidelity rules, control codes, and program control, representing the most widespread monitoring methods in modern technical systems and built-in control. In addition, we examine long-known, albeit less common, monitoring methods: diagnosis with partition into classes and diagnosis based on algebraic invariants.

Keywords: technical condition monitoring, redundancy management, diagnosis, built-in control, control codes, partition into classes, algebraic invariants.