

УДК 004.891.3 (045)

Я. М. Аль Шаро асп.,
В. В. Захаренков канд. техн. наук,
В. А. Игнатов д-р техн. наук, проф.,
С. А. Кудренко канд. техн. наук НАУ

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И РЕКОНФИГУРАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ИЗБЫТОЧНЫХ СИСТЕМ С ЦИФРОВЫМИ СИГНАЛАМИ

Институт информационно-диагностических систем НАУ, e-mail: igvali@ukr.net

Рассмотрены алгоритмы диагностирования и реконфигурации функционально-избыточных систем с цифровыми сигналами при отказах каналов, в которых функциональная избыточность создается ориентацией осей избыточных сигналов по направлениям, не совпадающим с направлениями осей ортогонального базиса.

Ключевые слова: функционально-избыточные цифровые системы, алгоритмы диагностирования и реконфигурации, отказы каналов, неортогональный базис избыточных сигналов.

Введение. По мере усложнения современных технических систем и увеличения количества выполняемых ими функций все более высокие требования предъявляются к качеству функционирования систем [1]. В этом актуальном научном направлении особое значение приобретают проблемы обеспечения качества функционирования систем ответственного назначения. К ним относятся системы управления космическими объектами, атомными электростанциями, воздушным движением, мореплаванием, объектами автомобильного и железнодорожного транспорта, телекоммуникационные системы специального назначения и другие. Принципиальной отличительной особенностью таких систем является высокий удельный вес цифрового представления используемых в них сигналов. Это обусловлено компьютеризацией систем и высокими требованиями к качеству и эффективности функционирования.

Основным средством предупреждения и развития опасных ситуаций, связанных с отказами компонентов систем ответственного назначения и предупреждением несанкционированных воздействий на них, является введение избыточностей [2 – 4]. Избыточность в той или иной степени эффективности позволяет парировать несанкционированные воздействия, отказы и неисправности элементов систем, поддерживать качество функционирования систем на требуемом уровне, предупреждать случаи человеческих жертв и экологических катастроф.

В наших предыдущих работах [1 – 14]:

- выполнено теоретическое обоснование возможных способов и технологий введения избыточности;
- разработаны методы оценивания эффективности избыточных систем;
- предложены методы контроля, диагностирования и прогнозирования качества систем;
- разработаны методы статистической оптимизации качества функционирования систем с учетом реально существующих ограничений технико-экономического характера;
- обоснованы методы оптимального управления качеством на всех стадиях жизненного цикла систем.

В то же время остаются недостаточно изученными актуальные проблемы диагностирования функционально-избыточных систем (ФИС) по интегральным показателям качества, самодиагностирования ФИС в процессе функционирования в штатном режиме, самовосстановления требуемого качества функционирования без вмешательства обслуживающего персонала, реконфигурации архитектуры и структуры ФИС при обнаружении отказавших элементов, построения интеллектуальных и экспертных систем обеспечения качества ФИС и др.

Цель работы заключается в том, чтобы рассмотреть модели и алгоритмы диагностирования и реконфигурации ФИС с цифровыми сигналами при отказе телекоммуникационных каналов.

Для достижения цели ставятся и решаются следующие задачи:

- разработка алгоритма диагностирования ФИС по невязкам;
- обоснование принципов схемотехнической реализации алгоритмов (основных принципов построения структурных схем алгоритмизации ФИС);
- разработка общих подходов к программной реализации алгоритмов.

В первой задаче рассматривается алгоритм для шестиканальной ФИС с ориентацией осей чувствительности, как показано на рис. 1. В основу алгоритма положен метод векторного мажоритарного резервирования с использованием уравнений для невязок и логических операторов для синдромов [3; 4]. Иллюстрации этих алгоритмов приведены для шестиканальных ФИС. В последующих задачах рассматриваются построение алгоритмов диагностирования и реконфигурации для произвольного базиса ($n \neq 3$, n -размерность базиса). Кроме систем управления трехмерными объектами, предложенные алгоритмы могут оказаться полезными для целей разработки методов помехоустойчивого и криптографического кодирования.

Постановка проблемы. В качестве известных исходных данных рассматриваются принципы построения ФИС и общие требования, которым должны удовлетворять разрабатываемые алгоритмы диагностирования и реконфигурации. В качестве основного метода решения задачи выбран метод максимального правдоподобия, который в предположении о справедливости нормального распределения случайных переменных приводит к методу наименьших квадратов. В роли ожидаемых результатов рассматриваются алгоритмы диагностирования и реконфигурации ФИС.

Решение проблемы. Декомпозиция проблемы построения алгоритма диагностирования ФИС, в которых используют цифровые сигналы, приводит к решению следующих относительно простых задач:

- выбору допустимой погрешности передачи сигналов при наличии помех по существу, выбору требуемого отношения сигнал/шум для равномерного p -разрядного кода, выраженного через число $s < p$ младших разрядов кодовой комбинации;
- построению по заданной матрице A , порождающей избыточность ФИС, системы уравнений для невязок,
- формализации признака отказа канала системы в виде логического условия;
- преобразованию признаков отказа каналов в синдромы состояний системы;
- установлению функциональных зависимостей между сочетанием синдромов и состояниями системы;
- использованию полученных результатов для построения соответствующей структурной схема алгоритма диагностирования ФИС с цифровыми сигналами по невязкам.

Проблема решается на примере векторного измерителя с количеством основных $n = 3$ и m резервных координат, равным количеству основных координат, т. е. $m = n$. Следовательно, для обеспечения требуемого качества работы измерителя трехмерное пространство измерений расширяется до шестимерного, которое является основным для штатной работы ФИС, при отказах каналов измерения размерность рабочего пространства уменьшается соответственно с шести до трех.

В качестве общих требований к разрабатываемым в данной работе алгоритмам укажем следующие требования. При $n = 6$ алгоритмы должны обеспечивать:

- обнаружение отказа любого одного из шести первичных измерителей;
- после выявления первого отказа адаптацию к обнаружению отказа любого одного из оставшихся работоспособными пяти измерителей;
- информацию о полном отказе системы после выявления третьего отказа;

– реконфігурацію структури избыточного векторного сигнала и восстановление достоверной оценки измеряемой физической величины при отказах первичных измерителей.

Задачи решаются при следующих трех допущениях:

1. Одновременное появление отказов двух каналов рассматривается как маловероятное событие (согласно основной гипотезы теории надежности).

2. Функционально-избыточная система представляет собой векторный измеритель, образуемый n основными и m резервными каналами. Примеры приводятся для $n = 3$.

3. Оси чувствительности основных каналов (рис. 1) ориентированы по осям основного базиса объекта управления, а оси чувствительности резервных каналов ориентированы под углом 45° относительно каждой пары осей основного базиса.

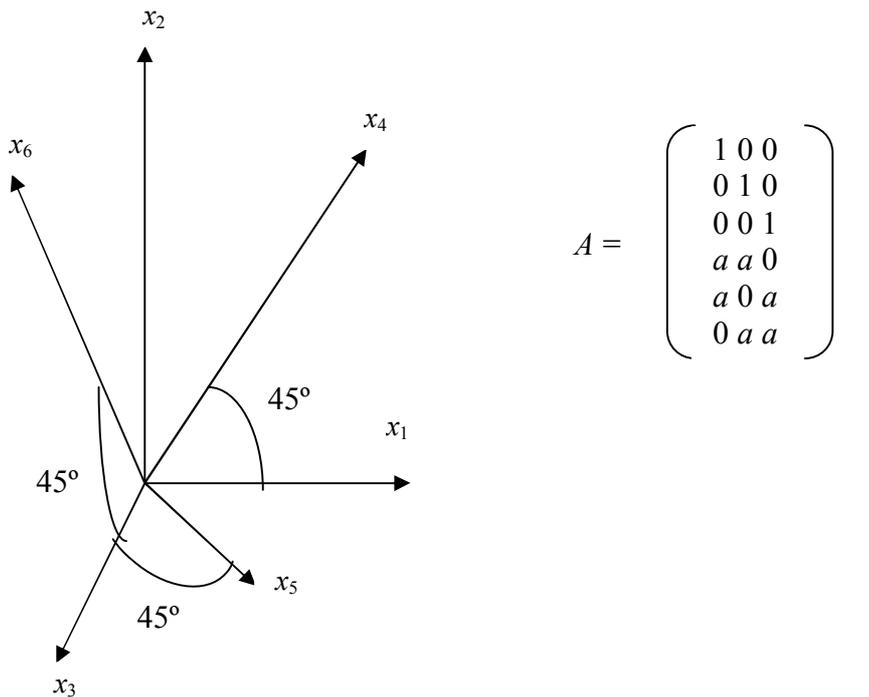


Рис. 1. Ориентация осей чувствительности векторного измерителя:

A – матрица направляющих косинусов, определяющая ориентацию осей избыточных каналов;

$$a = \cos\pi/4 = \sqrt{2} / 2$$

Рассмотрим способ построения алгоритмов диагностирования ФИС по невязкам. В соответствии с принципом действия ФИС на выходе векторного измерителя получают шесть цифровых сигналов с разрядностью p , сформированных шестью отдельными каналами. Аналитическая связь между сигналами определяется векторным уравнением

$$(x_1, \dots, x_6) = \mathbf{A} (z_1, z_2, z_3),$$

где $\mathbf{z} = (z_1, z_2, z_3)$ – вектор измеряемой физической величины; x_1, \dots, x_6 – сигналы на выходах каналов векторного измерителя, \mathbf{A} – определяющая матрица ФИС размерности 6×3 (рис. 1).

В матрице \mathbf{A} любые три строки являются независимыми. Уравнения связи между сигналами x_1, x_2, x_3 основных каналов и сигналами x_4, x_5, x_6 избыточных каналов являются уравнениями для невязок e_1, e_2, e_3 . Введем масштабирование избыточных сигналов с коэффициентом, равным $\sqrt{2}$. Это преобразование необходимо для того, чтобы их мощность равнялась мощности основных сигналов.

Запишем систему уравнений для невязок в следующем виде

$$e_1 = x_1 + x_2 - \sqrt{2} x_4, \quad e_2 = x_1 + x_3 - \sqrt{2} x_5, \quad e_3 = x_2 + x_3 - \sqrt{2} x_6. \quad (1)$$

При условии абсолютной точности измерений только во всех основных каналах системы невязка

$$e_i = 0, \quad i = 1, 3.$$

При наличии допустимой погрешности измерений в реальных условиях s младших разрядов двоичного кода невязки будут отличны от нуля (допустимый «дрейф нуля»). Но при этом выполняется условие обеспечения заданной точности измерений в i -м канале

$$e_i \leq 2^s. \quad (2)$$

В качестве признака отказа i -го канала примем противоположное условие

$$e_i > 2^s, \quad (3)$$

где величина границы допуска 2^s определена в пределах s разрядов так, что $p > s$. Например, для 16-разрядного двоичного кода при заданной среднеквадратической относительной погрешности измерений, равной 5%, $s = 11$, т. е. составляет 11 младших разрядов.

С учетом введенных условий (2), (3) преобразуем сигнал первой невязки e_1 в синдром вида

$$E_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } x_1 + x_2 - \sqrt{2}x_4 \leq 2^s; \\ 1, & \text{если } x_1 + x_2 - \sqrt{2}x_4 > 2^s. \end{cases} \quad (4)$$

Аналогично обозначим синдромы E_2, E_3 по невязкам e_2, e_3 .

Для проведения диагностирования ФИС синдромы, сформированные согласно логическому условию (4), преобразуются логическими операторами в логические функции, которые характеризуют следующие события:

Q_0 – состояние полной исправности ФИС;

Q_i – событие, которое характеризуется отказом любого одного i -го канала, $i = 1, 6$;

Q_{ij} – событие, которое характеризуется отказом j -го канала при условии, что ранее произошел отказ i -го канала (событие Q_i).

Событие Q_{ij} определяем как полный отказ ФИС.

Функциональная зависимость событий от синдромов приведена в табл. 1.

Таблица 1

Функциональная зависимость событий от синдромов

E_1	E_2	E_3	\bar{E}_1	\bar{E}_2	\bar{E}_3	Событие
0	0	0	1	1	1	Q_0
1	1	0	0	0	1	Q_1
1	0	1	0	1	0	Q_2
0	1	1	1	0	0	Q_3
1	0	0	0	1	1	Q_4
0	1	0	1	0	1	Q_5
0	0	1	1	1	0	Q_6
1	1	1	0	0	0	Q_{ij}

Условия (2), (3), (4) и данные табл. 1 позволяют разработать структурную схему алгоритма диагностирования ФИС, представленную на рис. 2.

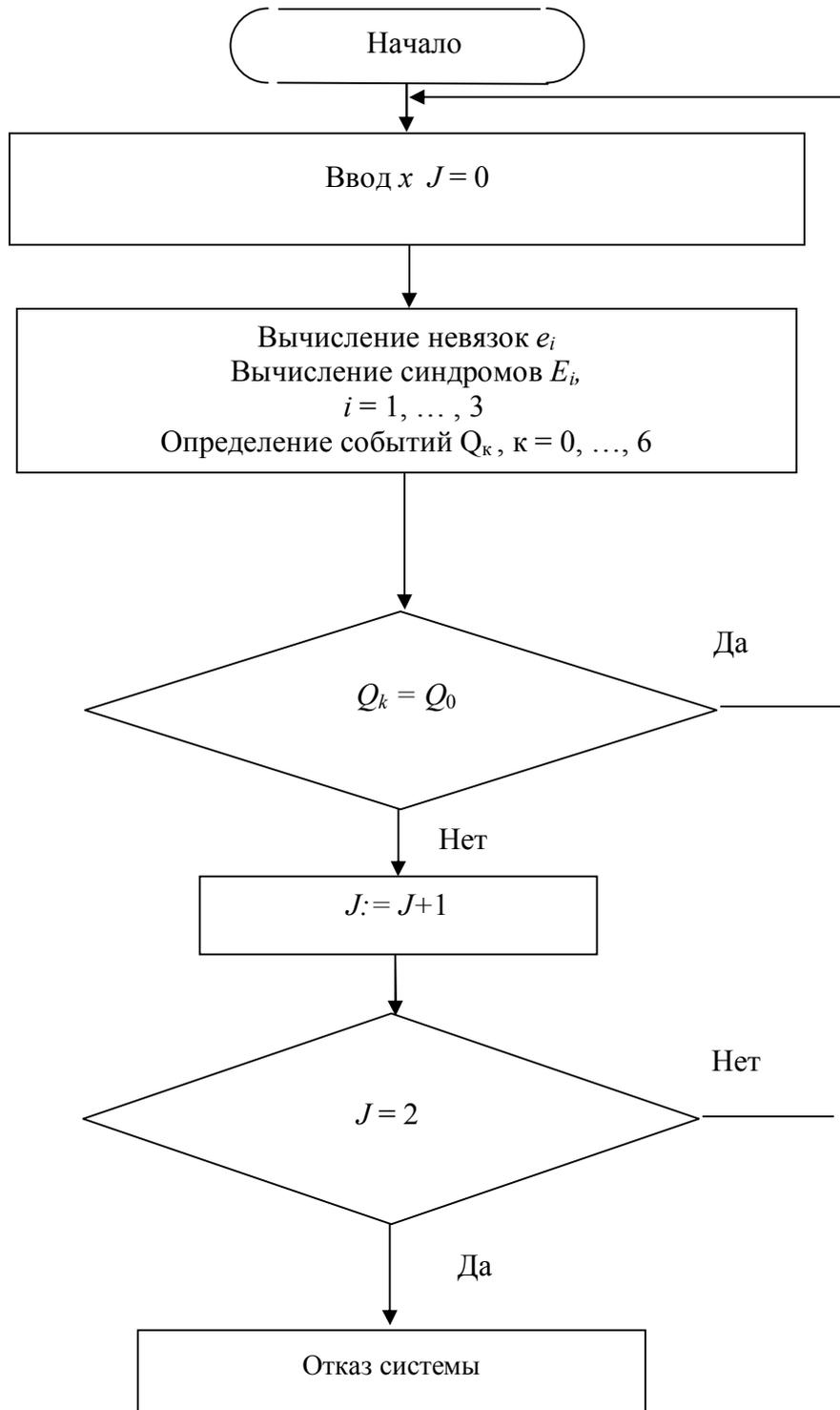


Рис. 2. Структурная схема алгоритма диагностирования ФИС с цифровыми сигналами по невязкам

Алгоритм работает следующим образом. Известны исходные данные служат элементы порождающей избыточности матрицы A , результаты косвенных измерений (x_1, x_6) , параметр кода p и количество разрядов s допустимой относительной погрешности, система уравнений (4), заполненная табл. 1 синдромов и состояний ФИС. На первом шаге вводятся исходные данные и количество допустимых отказов J для ФИС. На втором шаге вычисляются невязки, синдромы и для перебора задается полная группа состояний ФИС $Q_k, k = 0, 1, \dots$. На третьем, четвертом и пятом шагах соответственно выбирается одно событие Q_k и проверяются

логические условия его совпадения с событиями полной группы при $J = 0, 1, 2$. При $J = 0$ фиксируется то, что ФИС находится в работоспособном состоянии и выполняется переход к $J = 1$ для мониторинга любого одного отказа и реконфигурации структуры системы при одном отказе. При $J = 2$ фиксируется отказ системы и необходимость восстановления работоспособности ФИС.

Этот алгоритм без труда реализуется с помощью цифровых интегральных схем, особенно, если частота обращения к алгоритму достаточно низкая, например, с интервалом времени в несколько секунд. При низких частотах выборки схемотехническое решение алгоритма можно значительно упростить, выполняя все операции последовательно в одном и том же арифметическом устройстве. Промежуточные результаты можно запоминать в буферной памяти устройства диагностирования до следующего тактового импульса. Для выполнения подобных алгоритмов очень удобно применять микропроцессоры и микро-ЭВМ [14].

Данный алгоритм диагностирования существует только для систем, которые содержат не менее трех каналов с ориентацией по размерности базиса объекта управления. В противном случае соотношения (2) и (3) окажутся несуществующими. Для практического применения данного алгоритма интересным является случай, когда три канала с ортогональной ориентацией осей объединены в моноблок. Такое конструктивное исполнение датчиков измерения координат принято рядом ведущих фирм-производителей измерительной техники и средств управления для спутников и изделий авиационной техники.

Один моноблок устанавливается с ориентацией в ортогональном базисе объекта управления, а второй – может быть ориентирован так, чтобы все проекции избыточных сигналов на оси основного базиса были отличны от нуля. Это позволяет выполнять оптимальную обработку результатов измерений. С вычислительной точки зрения ориентацию второго моноблока наиболее выгодно выбрать так, чтобы одна из его осей чувствительности была расположена под равными углами относительно трех, а другая – была бы расположенной под равными углами только относительно двух осей базиса. В этом случае в матрице A клетка с направляющими косинусами осей чувствительности второго моноблока имеет вид

$$\begin{array}{ccc} \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ \frac{\sqrt{6}}{6} & -\frac{2\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{6}}{6} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{array}$$

После элементарных преобразований получим систему уравнений для невязок в виде:

$$\left. \begin{array}{l} e_1 = x_1 - 2x_2 + x_3 - \sqrt{6}x_5; \quad e_2 = x_1 + x_3 - \sqrt{2}x_6; \\ e_3 = \sqrt{3}x_2 - x_4 - \sqrt{2}x_5; \quad e_4 = 2x_4 + \sqrt{2}x_5 - \sqrt{6}x_6. \end{array} \right\} \quad (5)$$

Уравнения (5) порождают синдромы, представленные в табл. 2.

Построение алгоритма диагностической процедуры по табл. 2 аналогично вышеизложенному построению. Необходимо отметить, что данный метод диагностирования наиболее интересен в применении к восстанавливаемым системам с малым временем навигации (несколько часов) и к системам, для которых интервал между профилактиками с восстановлением установлен намного меньше времени до первого отказа.

Таблица 2

Функциональная зависимость событий и синдромов

E_1	E_2	E_3	E_4	\bar{E}_1	\bar{E}_2	\bar{E}_3	\bar{E}_4	Событие
0	0	0	0	1	1	1	1	Q_0
1	1	0	0	0	0	1	1	Q_1
1	0	1	0	0	1	0	1	Q_2
1	1	0	0	0	0	1	1	$Q_3 = Q_1$
0	0	1	1	1	1	0	0	Q_4
1	0	1	1	0	1	0	0	Q_5
0	1	0	1	1	0	1	0	Q_6
1	1	0	0	0	0	1	1	$Q_{13} = Q_1$
1	0	1	1	0	1	0	0	Q_{24}
1	0	1	1	0	1	0	0	$Q_{25} = Q_{245}$
1	1	1	1	0	0	0	0	$Q_{отказа}$

Выводы.

1. Поставлена и решена задача построения алгоритма диагностирования и конфигурации ФИС с цифровыми сигналами по невязкам.

2. Показано, как по известной, порождающей избыточность сигналов, матрице выполняется построение систем уравнений (1), (5) для невязок. Выполнена формализация признака отказа каналов ФИС с помощью логического условия (3). Показано, как признаки отказов преобразуют в синдромы (4) состояний системы, а сочетания синдромов отображают в состояния системы для ее диагностирования и последующей реконфигурации.

3. Разработана структурная схема алгоритма диагностирования ФИС с цифровыми сигналами по невязкам (рис. 2).

Список литературы

1. *Игнатов В. А.* Статистическая оптимизация качества функционирования электронных систем. / В. А. Игнатов, Г. Г. Маньшин, В. А. Трайнев М.: Энергия. 1974. – 264 с.
2. *Диагностические комплексы систем автоматического самолетовождения.* / В. А. Игнатов, С. М. Паук, Г. Ф. Конахович / под ред. В. А.Игнатова. М.: Транспорт. 1975. – 272 с.
3. *А. с. СССР №782162.* Мажоритарное устройство для выделения проекций векторной величины / Игнатов В. А., Захаренков В. В. (СССР). 1978. Бюл. №6.

4. А. с. СССР №828448. Устройство выбора непрерывного сигнала по принципу большинства / В. А. Игнатов, В. В. Захаренков (СССР). 1981. Бюл. №8.
5. А. с. СССР №1494235. Устройство для автоматизированного контроля радиостанции / В. А. Игнатов, В. И. Карпец (СССР). 1989. Бюл. №10.
6. Игнатов В. А. Оптимальные задачи обслуживания авиационных систем на основе контроля работоспособности / В. А. Игнатов, Таджи Тайсир, В. В. Уланский Прогрессивные методы эксплуатации радиоэлектронного оборудования аэропортов и воздушных трасс гражданской авиации. – К.: КИИГА, 1982. – С. 9 – 18.
7. Игнатов В. А. Метод избыточного диагностирования авиационных систем / В. А. Игнатов, Б. Н. Стоянов Технологические процессы при эксплуатации радиоэлектронного оборудования гражданской авиации. – К.: КИИГА, 1985.– С. 7 – 17.
8. Игнатов В. А. Оптимальное управление диагностированием изделий авиационной техники / В. А. Игнатов, И. А. Мачалин – Авиационная и космическая техника – Х.: ХАИ, 2006. – №6. С. 5 – 18.

Я. М. Аль Шаро, В. В. Захаренков, В. О. Игнатов, С. О. Кудренко

Діагностування та реконфігурація функціонально-надлишкових систем з цифровими сигналами

Розглянуто алгоритми діагностування й реконфігурації функціонально-надлишкових систем (ФНС) із цифровими сигналами у разі відмов каналів, у яких функціональна надмірність створюється орієнтацією осей надлишкових сигналів у напрямках, що не збігаються з напрямками осей ортогонального базису.

Y. M. Al Sharo, V. V. Zaharov, V. A. Ignatov, S. A. Kudrenko

Diagnosing and reconfiguration of the functional superfluous systems by digital signals

Algorithms of diagnosing and reconfiguration of the functional superfluous systems (FSS) with digital signals at refusals of channels in which functional redundancy is created by orientation of axes of superfluous signals on the directions which are not conterminous to the directions of axes of the orthogonal basis are considered.