

УДК 656: 385.33: 316

М.А. Мирошник<sup>1</sup>, Ю.Н. Салфетникова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков

<sup>2</sup> Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

*Проведен системный анализ традиционных методов диагностирования и методов диагностики сложных систем. Предложены методы принятия решений при оценке состояния объектов диагностики.*

**Ключевые слова:** диагностирование сложных систем, методы, модели.

### Введение

Анализ методов диагностирования сложных систем показывает, что высокое качество диагностического обеспечения достигается использованием тестовых методов проверки, статических и динамических процессов диагностирования, встроенных средств тестирования и международных стандартов тестопригодного проектирования IEEE 1149.1 и IEEE P1500 [1 – 4].

Процесс создания системы диагностики сложных объектов включает следующие взаимосвязанные этапы: построение диагностической модели; выбор способа диагностирования; определение класса неисправностей, подлежащих обнаружению и поиску; выбор тестов, методов контроля; анализ результатов тестирования, контроля [1 – 6].

В ряде практических случаев проектирование сложных систем осуществляется без глубокой проработки вопросов организации процедур диагностики, автоматизации поиска дефектов и отказов. В итоге задача диагностики решается в лучшем случае, когда система спроектирована, в худшем, – когда она изготовлена.

При этом создаваемые средства диагностики узкоспециализированы, а затраты на них велики и малоэффективны. Это вызвано следующими причи-

нами: это и нечеткая регламентация требований технического задания к разработке средств диагностики, и недостаток финансирования, сжатость сроков проектирования, и одна из главных причин – недостаточная профессиональная подготовка разработчиков в вопросах теории и практики технической диагностики.

Эти недостатки исключаются при комплексном подходе на этапе проектирования. Разработку аппаратуры диагностики необходимо считать такой же обязательной, как и само создание объекта диагностики (ОД) при проектировании объекта и элементов диагностики синхронно во времени.

**Целью данной статьи является** исследование методов диагностирования сложных систем и теоретическое обоснование модели диагностической инфраструктуры с интеллектуальными свойствами, гарантирующей минимальность затрат на ее построение. Сформулированная цель достигается решением следующих задач: разработка расширенной модели сложной системы, включающей механизмы проверки узлов современных микропроцессорных устройств управления; разработка методов организации процедуры диагностирования для обнаружения неустойчивых функциональных неисправностей перемежающегося типа [6,7].

## Постановка задачи

С целью информирования специалистов в области проектирования сложных объектов, а именно: информационно-вычислительных и телекоммуникационных комплексов, систем управления подвижными объектами, малоинерционными объектами имеет смысл представить систематический анализ традиционных методов диагностирования их статического и динамического состояния. Такая работа позволит создать предпосылки по внесению в постановку задач проектирования вышеупомянутых объектов особых рекомендаций и положений в области диагностирования и контроля их состояния, что позволило бы создать условия для параллельного проектирования сложных объектов и систем контроля и диагностики их состояния [7 – 11].

## Обобщенная классификация моделей и методов диагностирования

Поскольку техническая диагностика применяется для решения различных задач по определению состояния разнообразных технических устройств и систем, вначале представим наиболее обобщенный классификационный анализ методов синтеза диагностических моделей технических объектов.

В самом обобщенном виде известные методы и алгоритмы при всем своем многообразии реализуют один из двух известных подходов к решению задачи диагностики: классификационный или индикаторный.

**Классификационный подход.** При классификационном подходе речь идет о концептуальном единстве разнообразного круга методов и алгоритмов, разработанных для задач контроля и диагностики, которые сводят их к задаче классификации.

Сущность классификационного подхода заключается в том, что строится в пространстве  $\Omega$  контролируемых параметров множество состояний ОД. Задача подхода заключается в проверке принадлежности элемента  $\omega$ , отражающего совокупность значений контролируемых параметров одному из непересекающихся подмножеств  $\Omega_i \in \Omega, i = 1 \dots k$ , где  $k$  – число классов состояний объекта, соответствующих конкретным отказам.

К методам, реализующим классификационный подход, относят: допусковой контроль, методы, базирующиеся на аппарате математической логики, прикладные алгоритмы теории распознавания образов, формализацию состояния ОД в базисе теории категорий.

**Индикаторный подход.** При индикаторном подходе центральным звеном диагностики является поиск некоторого равенства в виде:

$$\Phi(u, y) = \Delta, \quad (1)$$

где  $x$  и  $y$  — входные и выходные сигналы ОД,

$\Phi(*)$  — некоторый оператор;  $\Delta$  —  $g$ -мерный вектор, называемый индикатором, принимающий нулевые значения только при исправных технических состояниях ОД. Структура оператора  $\Phi$  поглотила все содержание классификационной задачи, фигурирующей в предыдущем подходе. Условием (1) можно пользоваться в задачах контроля различного типа (тестовый или функциональный контроль, контроль правильности и неправильности функционирования и др.).

## Классификация моделей сложных объектов диагностики. Диагностические ПМЧ модели

Классификацию моделей ОД произведем по таким признакам, как форма представления модели, характер изменения состояния модели, значность алфавита оценки результатов тестирования, стратегия тестирования (в рассмотрении включены и модели самодиагностирующихся объектов), степень детерминизма, содержание графа модели.

Традиционным подходом к организации диагностического эксперимента на поведенческом уровне является использование графоаналитических моделей Препарата-Метца-Чена (ПМЧ) [1 – 3], предложенных Препаратой, Метцом, Ченом, и модель Рассела и Кайма [1-3].

В предложенной модели неопределенность, вносимая неисправными модулями в процессе диагностического эксперимента, позволяет завершить его успешно, если число  $t$  неисправных модулей ограничено и идентифицируется на основе анализа некоторого множества диагностических синдромов.

Кроме того, диагностические эксперименты с использованием ПМЧ моделей разрабатывались для класса устойчивых и константных неисправностей, которые не изменялись в процессе всего эксперимента.

Известно небольшое число опубликованных работ, в которых ПМЧ модели использовались для организации диагностических экспериментов для обнаружения модулей с перемежающимися неисправностями. В них были определены необходимые и достаточные условия построения диагностического эксперимента с требуемыми тестовыми интерфейсными связями и соответствующими тестовыми синдромами.

Согласно алгебраическому подходу все возможные технические состояния ОД для заданного множества неисправностей представляются булевыми уравнениями. Алгебраическую модель используют в случаях, когда графо-теоретические подходы неприменимы. Отметим, что указанные модели системного уровня максимально абстрагированы от конкретной реализации систем, что ограничивает глубину поиска отказов, но одновременно

допускают применение единых методов для диагностирования ОД, построенных из модулей и связей различной физической природы.

К моделям аналоговых объектов относят: модели логического типа, модели в виде систем дифференциальных уравнений и графоаналитические модели.

Функциональный подход или функционально-логическая модель являются наиболее удобной формой представления ОД, относящихся к непрерывным устройствам и многим дискретным системам. Исходными данными для построения логических моделей являются: структурные, функциональные и принципиальные схемы объекта; системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающие объект; причинно-следственные связи между параметрами объекта. Исследуемый ОД представляется совокупностью взаимосвязанных блоков, каждый из которых имеет один выход и существенные для данного выхода входы. Основное достоинство логических моделей – их простота. Логические объекты не лишены недостатков: они не применимы для моделей, охваченных обратными связями; для многорежимных ОД необходимо осуществлять декомпозицию поиска дефектов для каждого режима с последующей интеграцией проверок; при построении матрицы неисправностей необходимо учитывать кратные отказы, что приводит к увеличению ее размерности.

Дифференциальные диагностические модели применяются для диагностики динамических аналоговых объектов. Их свойства определяются линейными и нелинейными дифференциальными уравнениями, а в ряде случаев используют характеристические или эквивалентные уравнения.

Достоинством таких моделей является: возможность формулирования условий работоспособности в виде ограничений на реакцию объекта при стандартном входном воздействии и изменении коэффициентов уравнений и, в общем случае, при перемещении полюсов и нулей на комплексной плоскости.

К недостаткам дифференциальных моделей следует отнести: необходимость знания большого числа параметров объекта, которые на этапе проектирования с достаточной точностью получить не удается; решение задач поиска дефектов с помощью модели дифференциальных уравнений может быть выполнено только в тех случаях, когда известны связи между коэффициентами уравнений и параметрами объекта, характеризующими наличие в нем дефектов.

Графоаналитические модели ОД представляются в виде диаграмм прохождения сигналов. Диаграмме обычно соответствует система алгебраических линейных уравнений; узлам диаграммы соот-

ветствуют переменные (ветви характеризуют связь между переменными); их операторам – коэффициенты уравнений.

Графоаналитическая модель ОД задается ориентированным графом, вершинам которого ставятся в соответствие либо свойства объекта, либо характеризующие эти свойства параметры.

Достоинством графоаналитических моделей является учет структурных особенностей и внутренних связей в объекте.

К недостаткам указанной модели следует отнести: для оценки весов дуг и вершин графа приходится пользоваться оценками экспертов; при большой размерности модели ОД необходимо проводить ее декомпозицию по множеству отказов с разбиением их на классы, отображения которых в пространстве параметров не должны пересекаться. Общим недостатком всех рассмотренных моделей диагностирования аналоговых объектов является необходимость знания структурных, функциональных или принципиальных схем ОД, причинно-следственных связей между функциональными блоками и параметрами.

Это ограничивает область применения таких моделей, особенно в случаях, когда ОД является чрезвычайно сложным или отсутствует информация об его внутренней структуре.

### Методы диагностирования

Разработка алгоритмов по реализации методов поиска отказов, дефектов – основная задача технического диагностирования, при этом могут быть использованы некоторые критерии эффективности (минимум средних потерь, затрат на поиск дефекта, восстановление работоспособности и т.п.). Очевидно, что синтез эффективных алгоритмов связан с решением задачи оптимизации. Рассмотрим основные алгоритмы технической диагностики.

#### Безусловный алгоритм (метод "время-вероятность")

Метод "время-вероятность" можно рассматривать как экспериментально статистический метод, суть которого состоит в следующем: в соответствии с заданной последовательностью осуществляют контроль состояния элементов, при обнаружении и фиксации адреса отказавшего элемента поиск прекращается и приступают к восстановлению объекта. Качество алгоритма диагностики метода "время-вероятность" оценивают по математическому ожиданию времени восстановления. Оптимизация диагностирования осуществляется в соответствии с отношением

$$q_1 / \tau_1 > q_2 / \tau_2 > \dots > q_n / \tau_n,$$

где  $q_i \in [0,1]$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента,

$t_i$  – время, необходимое для проверки  $i$ -го элемента ОД.

Достоинства метода: возможность его применения для ОД с произвольным соединением элементов с различными вероятностями, состояниями, а также с различными стоимостями контроля параметров. При этом среднее время поиска любого неисправного элемента для данной функциональной модели ОД оказывается минимальным.

Недостатки метода: область применения метода ограничивается ОД, для которых возможно построение функциональной модели; необходимость знания времени контроля параметров функциональной модели; необходимость знания времени контроля параметров функциональных элементов и вероятностей различных состояний ОД, которые в течение жизненного цикла ОД существенно изменяются.

#### **Построение диагностического алгоритма методом динамического программирования.**

По этому методу осуществляется построение оптимального по средней стоимости условного алгоритма поиска дефекта ОД с произвольным соединением функциональных элементов. При этом учитывают результаты предыдущих проверок.

Для этого выбирают первую проверку  $k_1^1$  и в зависимости от ее исхода множество состояний  $S = \{S_i\}$ .

ОД делят на два подмножества  $S_i^0$  и  $S_i^1$ , а затем выбирают проверки, разделяющие эти подмножества, и такой выбор продолжают до тех пор, пока множество не будет разделено на отдельные состояния.

Эффективность этого алгоритма относительно полного перебора, определяемого по числу возможных проверок  $k!$ , очевидна.

#### **Алгоритм диагностики в базисе теории информации**

Способ заключается в выборе минимального количества контролируемых параметров ОД и определении последовательности их контроля. В качестве определяющей функции при составлении алгоритма диагностики используют количество информации, содержащейся в проверке. Алгоритм начинается с проверки, несущей наибольшее количество информации, а каждая последующая проверка определяется, исходя из результатов предыдущей, а также исходя из наибольшего количества информации проверки. Ясно, что комплектование проверок осуществляется на основании равновероятностной декомпозиции. Если зафиксировано, что отказ содержится в каком-либо из элементов  $i = 1, m$ , то следующую проверку выбирают по таблице, содержащей только  $m$  элементов по максимуму количества ин-

формации. Процесс продолжается до тех пор, пока увеличение числа контролируемых параметров приводит к снижению энтропии объекта. Максимальное необходимое число проверок ОД равно  $k \geq \log_2 N$ .

Очевидно, выбор проверок по максимуму количества информации и при равных значениях вероятностей отказов блоков приводит к поиску отказов по методу половинного разбиения. Известен и модифицированный алгоритм поиска с учетом стоимости получения информации.

Эффективность диагностики с учетом количества информации значительно выше, чем при последовательных проверках.

Недостатки метода: необходимость определения априорных вероятностей отказов элементов, метод распознает только однократные отказы.

#### **Построение программы поиска по иерархическому принципу**

Суть метода состоит в комплексировании системы диагностики в виде  $R$  автономных (по числу уровней иерархии) индикаторов. Для этого  $N$  первичных функциональных элементов ОД разбиваются на  $R$  групп по  $N_r$  элементов в каждой. Выходные параметры функциональных элементов объединяются в одной точке с измерительным устройством и индикатором неисправности. Последние также делятся на  $k$  групп по  $r_k$  штук в каждой. Выходы  $r_k$  индикаторов объединяются снова в одной точке с одним индикатором и т.д. до получения единственного индикатора неисправности.

Процедура поиска неисправности осуществляется последовательным просмотром индикаторов, начиная с самого верхнего уровня иерархии и соблюдая на каждом уровне порядок и продолжительность каждого просмотра в соответствии с принятой процедурой.

После обнаружения индикатора, зафиксировавшего неисправность, переходят к просмотру индикаторов следующего уровня.

Достоинство способа – простота логического анализа ОД, наглядность результатов, при этом требуется минимум исходной информации об ОД.

Недостатки метода: получаемый алгоритм поиска неисправностей не оптимален ни по времени, ни по средним затратам; если ОД является многорежимным или содержит взаимозаменяемые блоки и подсистемы, то для реализации метода необходимо построение дерева функций для каждого из режимов и с учетом резервированных подсистем.

#### **Метод половинного разбиения**

Метод половинного разбиения уже упоминался как частный случай, получаемый при построении алгоритмов диагностики в базисе теории информации и по иерархическому принципу.

Достоинства метода: его рационально применять в тех случаях, когда вероятности различных неисправностей одинаковы или неизвестны и когда затраты времени на проведение проверок различных блоков одинаковы; метод уменьшает максимальное число проверок, необходимых для отыскания любой неисправности.

Очевидные недостатки метода: ограниченность его применения, поскольку функциональная модель объекта диагностики должна быть представлена в виде последовательно соединенных функциональных блоков, что в подавляющем большинстве случаев для сложных объектов невозможно; метод не применим, если блоки объекта диагностики независимы друг от друга.

### Выбор метода диагностики

Выбор того или иного метода связан с характером (классом, типом) объекта, с условиями его использования (эксплуатацией) и определяется требованиями, предъявляемыми к выходным результатам диагностирования (достоверность, глубина, быстродействие, готовность объекта к выполнению своих функций, метрологическое обеспечение, решение задачи "сторож сторожей" и пр.).

Выбираемый метод, как правило, должен основываться на данных диагностического обеспечения, разрабатываемого при проектировании ОД.

Предлагается два альтернативных подхода к решению системной задачи по выбору метода диагностики: с формальных позиций прикладной теории множеств и функционального анализа. При этом возможны два варианта:

- одновременная (параллельная) разработка ОД и системы диагностики;
- разработка архитектуры системы диагностики для уже спроектированного ОД.

Выбор эффективного метода можно осуществить путем конструирования интегрального критерия эффективности для всех методов, образующих банк, и сравнения их между собой, в частности, путем использования метода главного показателя, а также путем использования традиционного способа разрешения функционала путем последовательных уступок и полного перебора.

Очевидно, что задача построения алгоритма эффективной классификации и обоснования известных методов мониторинга и диагностирования сложных объектов крайне актуальна, и ее решение лежит за рамками данного анализа.

### Выводы

По результатам обзора классификационного анализа существующих в настоящее время методов диагностики сложных объектов можно сделать следующий вывод: большинство методов диагностики

основано на использовании априорной информации об объекте диагностики в виде, например, таблицы неисправностей, вероятностей отказов элементов или состояний объекта диагностики, времени или стоимости контроля и т.п., что не всегда бывает в полной мере и достоверно известно для сложных ОД, характеризующихся многими параметрами и эксплуатирующихся в стационарных и нестационарных режимах.

В связи с этим наиболее целесообразно использовать последовательные вероятностные методы, позволяющие учитывать неопределенности и неполноту знаний об ОД, представленные посредством диаграммы.

### Список литературы

1. Оводенко А.В. Системный мониторинг методов диагностики сложных систем / А.В. Оводенко, А.П. Самойленко. // ИКСЗТ, 2010 – №2. – С. 36 – 42.
2. Мирошник М.А. Концептуальная модель диагностической инфраструктуры с интеллектуальными свойствами для телекоммуникационных систем. / М.А. Мирошник, Г.И. Загарий, Л.В. Дербунович, // Информційно – керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – №5. – С. 146.
3. Бережная М.А. Диагностические модели многопроцессорных систем управления / М.А. Бережная, Л.В. Дербунович, В.С. Суздаль, А.В. Соболев, Д.А. Татаренко // Информційно-керуючі системи на залізничному транспорті, – Харьков. – 2004. – №6 (50). – С. 33 – 37.
4. Мирошник М.А. Методы тестового диагностирования телекоммуникационных систем на базе одномерных однородных клеточных сетей. / М.А. Мирошник, Я.Ю. Королева // Информційно – керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 2. – С. 68–72.
5. Мирошник М.А. Разработка диагностического обеспечения многопроцессорных телекоммуникационных систем управления на основе концепции сигнатурного мониторинга / Г.И. Загарий, М.А. Мирошник, С.В. Панченко // Информційно – керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – №1. – С. 37–46.
6. Мирошник М.А. Разработка диагностических автоматных моделей динамических систем. / М.А. Мирошник, Я.Ю. Королева, М.Г. Рыжикова // Технология приборостроения. – 2010. – №1. – С. 15 – 18.
7. Мирошник М.А. Диагностирование микропроцессорных систем на системном и функциональном уровне. / М.А. Мирошник // Информційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – №3. – С. 3–41.
8. Бережная М.А., Королева Я.Ю. Диагностические эксперименты в системах защиты информации на сетях клеточных автоматов. / М.А. Бережная, Я.Ю. Королева // Информційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – № 4. – С. 142–145.
9. Бережная М.А. Тестовое диагностирование одномерных однородных структур / М.А. Бережная, Л.В. Дербунович и др. // Вестник НТУ "ХПИ". Харьков: НТУ "ХПИ", – 2008. № 31. – С. 49–57.
10. Бережная М.А. Диагностирование цифровых систем в свете современных электронных технологий / М.А. Бережная, Л.В. Дербунович, В.С. Суздаль // Вестник НТУ "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Информатика и моделирование. Харьков: НТУ "ХПИ", – 2005. № 56 – С. 3–8.

11. Бережная М.А. Диагностирование микроселектронных устройств на основе сигнатурно-синдромного сжатия данных. / М.А. Бережная, М.Г. Рыжикова // Второй Международный радиоэлектронный Форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2005, Харьков, ХНУРЭ, 19-23 сентября 2005. – С.115-118. и доклад. – С.98.

12. Rogozov Yu.I. Klassifikatsionnyy analiz metodov sinteza modeley diagnostirovaniya tekhnicheskikh sistem. / Yu.I. Rogozov, A.P. Samoilenko, O.A. Usenko //

Новые информационные технологии. Разработка и аспекты применения: Тезисы докладов IV Всероссийской научной конференции молодых ученых и аспирантов. – Таганрог: ТРТУ. – 2001. – С. 46-49.

Поступила в редколлегию 23.06.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.В. Дербунович, Харьковский национальный университет «Харьковский политехнический институт, Харьков.

#### **ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ**

М.А.Мирошник, Ю.Н.Салфетнікова

*Виконано системний аналіз традиційних методів діагностування та методів діагностування складних систем. Запропоновані методи прийняття рішень при оцінці стану об'єктів діагностування*

**Ключові слова:** діагностування складних систем, методи, моделі.

#### **RESEARCH METHODS FOR DIAGNOSIS OF COMPLEX SYSTEMS**

M.A.Myroshnyk, Yu.N.Salfyetskova

*System analysis of methods for diagnosis of complex systems and traditional methods of diagnosis is given. Methods of making decisions when estimating the state of diagnosis objects are proposed.*

**Keywords:** diagnosis of complex systems, methods, models.