

МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ ОТКАЗОВ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ БЛУЖДАЮЩЕГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ЯДРА

Институт компьютерных технологий Национального авиационного университета

Приводятся основные положения самодиагностирования вычислительных систем с блуждающим диагностическим ядром на основе гибкой структуры проверочных связей. Предлагается новый способ отслеживания текущих структур проверочных связей системы, основанный на характеристических числах диагностического графа системы.

Введение

Самодиагностированием называется процесс определения отказовой ситуации в системе путем обобщения результатов взаимных проверок функциональных блоков объекта. Данный вид диагностирования отличается от традиционных отсутствием внешнего диагностического ядра, на которое возлагаются функции анализа диагностической информации и выдачи диагноза. Самодиагностирование относится к тестовому диагностированию и позволяет диагностировать техническое состояние объектов, в которых возможно разбиение на функциональные блоки, обладающие возможностью выполнения тестовых проверок других функциональных блоков. К классу таких объектов и относится вычислительные системы, объединяющие несколько вычислительных машин, работающих под управлением общей операционной системы, соединенных общей шиной и решающих множество взаимосвязанных задач.

Анализ исследований и публикаций

Впервые идея самодиагностирования была предложена в работе Препарата Ф. [2]. В дальнейшем метод самодиагностирования получил развитие в работах Пархоменко П. П., Согомоняна Е. С., Коваленко А. Е., Гуляева В. А., Машкова В. А., а также Барси Т., Рассела Дж., Кима К. и других. В данных работах исследования проводились в направлении развития диагностических моделей и совершенствования методов диагностирования с централизованным и распределенным диагностическим ядром, при котором должен реализовываться заданный набор тестовых про-

верок. В зависимости от последовательности выполнения проверок общий метод можно разбить на два вида: последовательное и параллельное самодиагностирование. Наибольшее распространение получило параллельное самодиагностирование с распределенным диагностическим ядром [1, 2, 4]. Однако при реализации параллельного самодиагностирования вызывает затруднение при решении ряда проблемных вопросов: каким образом осуществить накопление диагностической информации в диагностическом ядре; каким образом выбрать или назначить вычислительный модуль системы, которому можно доверить выполнение анализа диагностической информации; каким образом выполнить самодиагностирование с заданной достоверностью; каким образом осуществлять самодиагностирование вычислительной системы в процессе выполнения основных алгоритмов функционирования. Все указанные недостатки и затруднения могут быть решены при реализации самодиагностирования с блуждающим диагностическим ядром, которое впервые было предложено в работе [3].

Актуальность разработки методики самодиагностирования с блуждающим диагностическим ядром обусловлена необходимостью повышения достоверности диагностирования и возможностью проведения фоновое диагностирование в процессе выполнения вычислительной системой основных задач.

Постановка задачи

Задачей является разработка методики обнаружения отказов на основе самодиагностирования с гибкими, случайными структурами проверочных связей.

Одной из общепринятых диагностических моделей, вычислительных систем (ВС) является диагностический граф (ДГ) ВС (рис. 1). Вершины ДГ соответствуют таким частям ВС, которые способны выполнить проверку технического состояния всех остальных частей системы. Выделенные части ВС названы вычислительными модулями (ВМ).

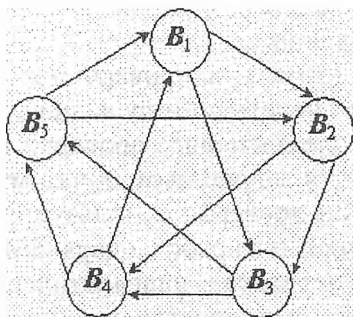


Рис. 1. Диагностический граф

Проверка одним вычислительным модулем технического состояния другого модуля называется элементарной проверкой. В общем случае элементарная проверка включает подачу на проверяемый ВМ последовательности входных тестовых воздействий и анализ проверяющим ВМ степени соответствия полученной последовательности выходных воздействий эталонной реакции на тест (рис. 2).

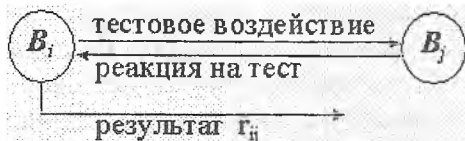


Рис. 2. Элементарная проверка

Результат проверки r_{ij} модуля B_j со стороны модуля B_i может принимать значение 0 или 1:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 - \text{если } B_i \text{ оценивает } B_j \text{ как испр.;} \\ 1 - \text{если } B_i \text{ оценивает } B_j \text{ как неисправ.} \end{cases}$$

Основная сложность дешифрирования результатов элементарных проверок и принятия решения о наличии в системе той или иной отказовой ситуации заключается в низкой степени доверия результату каждой проверки. Возможны ситуации, когда сам проверяющий модуль B_i неисправен и выдает случайный результат проверки. Вследствие этого анализ диагностической информации необходимо проводить после накопления определен-

ного множества результатов проверок $R=\{r_{ij}\}$, $i,j=1,\dots,n$, n – число вычислительных модулей в ВС.

Следует отметить, что основные параметры диагностирования – достоверность и время – будут зависеть от мощности множества результатов проверок $k=|R|$. Желание снизить время и повысить достоверность диагностирования являются противоречивыми требованиями:

$$t_D \downarrow \Rightarrow k \downarrow;$$

$$D_D \uparrow \Rightarrow k \uparrow.$$

Данное противоречие и является сущностью синтеза любой методики самодиагностирования при определении оптимального числа проверок в зависимости от требований $t_D \rightarrow \min$, $D_D \rightarrow \max$.

В зависимости от того, каким образом представляется результат элементарной проверки, различают несколько систем оценивания [1]. Анализ систем оценивания, выполненный в работе [4], показал, что наиболее адекватна процессам функционирования ВС система оценивания ПМЧ [2]. В этой системе оценивания результат элементарной проверки представляется следующим образом:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } B_i - \text{испр.}, B_j - \text{испр.}; \\ 1, & \text{если } B_i - \text{испр.}, B_j - \text{неиспр.}; \\ x = \{0,1\}, & \text{если } B_j - \text{неиспр.} \end{cases} \quad (1)$$

Вычислительный модуль считается неисправным, если его реакция на эталонные тестовые воздействия не совпадает с заранее рассчитанной. Очевидно, что полнота диагностирования ВМ определяется последовательностью, подаваемых на него тестовых воздействий.

Анализ метода параллельного самодиагностирования с распределенным диагностическим ядром

В общем случае самодиагностирование ВС заключается в следующем [1]. Вычислительная система разбивается на N вычислительных модулей, которые могут проверять друг друга. Заранее составляется расписание элементарных проверок, согласно которому осуществляются взаимодействия между вычислительными модулями системы. Процедуру самодиагностирования составляют элементарные проверки, выполняемые ВМ, в соответст-

вии с расписанием. Совокупность результатов элементарных проверок r_{ij} представляет собой синдром. По результатам проверок определяется ВМ, в который пересылается полученный синдром. Данный вычислительный модуль выполняет алгоритм анализа синдрома, который получил название алгоритма самодиагностирования, и, таким образом, определяет техническое состояние всех ВМ. После определения неисправных модулей в системе производится восстановление ВС путем замены неисправных ВМ или путем реконфигурации системы.

Следует отметить, что реализация представленного способа самодиагностирования имеет ряд серьезных затруднений. При работе ВС по назначению сложно реализовать жесткое расписание проверок, так как в данном случае процедура самодиагностирования является фоновой по отношению к рабочим алгоритмам функционирования модулей системы. При этом в системе возможны ожидания для проведения назначенных элементарных проверок, и время диагностирования ВС будет зависеть от объема решаемых задач в системе.

Трудной задачей является также определение вычислительного модуля системы, на который следует возложить функцию выполнения алгоритма самодиагностирования и выдачи результатов технического состояния вычислительных модулей системы.

Одним из существенных недостатков данного способа самодиагностирования является обязательный учет параметра t . Параметр t определяется как наибольшее количество неисправных ВМ в системе, при котором можно доверять полученному синдрому, а, следовательно, диагностировать систему. В работе [2] доказано, что системе невозможно диагностировать при:

$$t > \left\lfloor \frac{N-1}{2} \right\rfloor. \quad (2)$$

Достоверность результатов диагностирования данным методом определяется после выполнения процедуры диагностирования и зависит от результатов элементарных проверок и параметра t . Следовательно, при таком подходе возможно получение результата с низкой достоверностью, что вызовет новые трудности.

Основные понятия оперативного самодиагностирования с блуждающим диагностическим ядром

В связи с этим, предлагается новая организация самодиагностирования ВС, которая лишена перечисленных недостатков и трудностей при реализации. Такая организация получила название оперативного самодиагностирования вычислительных систем. Сущность ее заключается в следующем:

1) структура проверочных связей в системе недетерминированная, то есть гибкая; элементарные проверки в системе проводятся случайным образом; для организации проверок используется свободное время цикла работы двух ВМ;

2) передача диагностической информации выполняется на основе способа условной передачи результатов элементарных проверок;

3) каждый ВМ, получая диагностическую информацию, формирует признак достаточности структуры проверочных связей для проведения алгоритма диагностирования; критерием удовлетворения признака достаточности является минимум времени диагностирования; при удовлетворении указанного критерия вычислитель производит алгоритм диагностирования и определяет техническое состояние каждого вычислительного модуля системы.

Результаты исследований показали, что в большинстве случаев нет необходимости достигать назначенных полных жестких структур (например, как у Препарата [2]), а можно производить диагностирование с той же вероятностью меньшим числом проверок, за счет чего достигается выигрыш во времени диагностирования.

Так как элементарные проверки производятся случайным образом в свободное время цикла работы двух вычислительных модулей, то оперативное самодиагностирование может проводиться во время функционирования ВС по назначению. На основании этого можно считать, что гибкие структуры имеют преимущества над жесткими в плане зависимости реализации проверочных связей (элементарных проверок) от степени загрузки ВС при работе ее по назначению.

Для самодиагностирования гибкой структуры проверочных связей в отличие от жесткой нет необходимости в разра-

ботке алгоритма диспетчеризации выполнения элементарных проверок в системе, который предназначен для составления расписания.

При самодиагностировании с жесткой структурой также необходим дополнительный процесс для определения вычислительного модуля системы, на который следует возложить выполнение алгоритма. При гибкой структуре процесс ее отслеживания посредством метода условной передачи уже включает в себя определение данного вычислительного модуля. Это упрощает общую организацию процедуры самодиагностирования.

В случае восстановления системы путем реконфигурации при гибкой структуре не возникает затруднений (в отличие от жесткой) для последующего самодиагностирования системы.

При оперативном самодиагностировании с гибкой структурой проверочных связей достоверность определения технического состояния ВС задается перед началом выполнения процедуры самодиагностирования. В этом случае элементарные проверки в системе проводятся до тех пор, пока не будет достигнута заданная достоверность.

Оперативное самодиагностирование позволяет определять техническое состояние ВМ системы при любом количестве отказов в системе без учета параметра t и каких либо других ограничений.

При помощи данного метода можно диагностировать постоянные отказы ВМ системы и, в отдельных случаях, перемежающиеся отказы, так как процедура самодиагностирования производится через малые промежутки времени.

Числовые характеристики структур проверочных связей

При разработке и исследовании оперативного самодиагностирования с гибкой структурой проверочных связей использовались следующие диагностические модели ВС:

- диагностический ориентированный граф $G(V, E)$ (рис. 1), на котором множество вершин графа $V=\{v_i\}$ соответствует вычислительным модулям системы, а множество дуг $E=\{e_{ij}\}$ – элементарным проверкам ($i, j=1, \dots, N$);

- система линейных уравнений, составленная на основании текущей структуры проверочных связей в ВС.

Использование данных диагностических моделей ВС позволяет описать текущие структуры проверочных связей системы с помощью соответствующих инвариантов ДГ системы. В качестве таких инвариантов выбраны характеристические числа C_i , где $i=2, 3, \dots, N-1$. Физический смысл C_i заключается в следующем: C_i – это количество подмножеств X_i ВМ, состоящих из i модулей, которые проверяют все оставшиеся ВМ. Так, например, для ДГ, изображенного на рис. 1, характеристические числа принимают следующие значения:

$$C_2 = 5, \quad C_3 = 5, \quad C_4 = 5. \quad (3)$$

Характеристические числа C_i характеризуют любую текущую структуру проверочных связей как количество частично достаточных подструктур, которые содержатся в текущей структуре. Такой подструктурой с точки зрения диагностирования называется такая структура проверочных связей, при которой $i < N$ исправных модулей системы проверяют остальные $(N-i)$ вычислительных модулей.

Числовые характеристики C_i можно определить аналитически следующим образом. Необходимо рассмотреть модифицированную матрицу смежности ДГ A_m , в которой по главной диагонали в i -той строке стоят «1», если i -тый ВМ производит хотя бы одну проверку, и «0» – в противном случае. Для ДГ (рис. 1) модифицированная матрица смежности имеет следующий вид:

$$A_m = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Для матрицы A_m числа C_i будут обозначать количество различных вариантов покрытий i строками всех столбцов ненулевыми элементами. Характеристики C_i могут быть легко определены путем полного перебора всех элементов матрицы A_m . Например:

$$C_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n \left[\prod_{j=1}^n (a_{kj} \vee a_{ij}) \right] \quad (5)$$

где a_{ij} , a_{kj} – элементы матрицы A_m .

Обоснование способа накопления диагностической информации

Следует отметить, что для осуществления такого перебора необходимо, чтобы каждый ВМ имел полную информацию обо всех проверочных связях, то есть матрицу смежности ДГ.

Такой подход может быть приемлем, когда имеется внешнее диагностическое ядро. В системе же с блуждающим диагностическим ядром могут возникнуть затруднения при передаче диагностической информации. Пересылка информации из одного вычислительного модуля в другой осуществляется посредством метода условной передачи результатов элементарных проверок.

Сущность данного способа заключается в следующем (рис. 3):

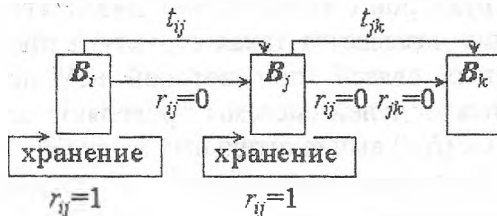


Рис. 3. Способ условной передачи диагностической информации

Проверяющий вычислитель системы в зависимости от результатов проверки t_{ij} может пересылать или оставлять у себя диагностическую информацию – результаты проверок. Если вычислитель B_i оценивает B_j как исправный, то B_i пересылает в вычислитель B_j результат элементарной проверки $\{r_{ij}\}$ и кодовое слово, несущее информацию о проверочных связях в системе. Вычислитель B_j , в свою очередь, пересылает в вычислитель B_k , если оценивает его исправным, результаты всех предыдущих проверок и соответствующее кодовое слово структуры проверочных связей. Принимая информацию о результатах проверок и кодовое слово структуры, каждый вычислительный модуль формирует признак достаточности и принимает решение на проведение алгоритма диагностирования.

Определение признака достаточности диагностической информации для выполнения ее анализа

При формировании признака достаточности структуры каждый ВМ определяет числовые характеристики C_i на основе кодов простых инвариантов диагностического графа. Характеристики C_i позволяют однозначно определить вероятность выдачи результата диагностирования системы. Аналитически ее можно определить как одновременное появление двух событий:

1) событие A – в текущей структуре проверочных связей найдется хотя бы одна достаточная подструктура;

2) событие B – каждый ВМ из доминирующего подмножества X_1 в этой достаточной подструктуре будет исправным.

Вероятности этих событий определяются следующим образом:

$$P(A) = \frac{C_i}{C_n}, \quad P(B) = p^i \cdot q^{n-i},$$

где C_i – числовые характеристики текущей структуры проверочных связей; C_n^i – количество комбинаций из n по i ; i – мощность подмножества X_1 в достаточной подструктуре ДГ; p – вероятность безотказной работы ВМ, принятая для всех модулей одинаковой; q – вероятность отказа ВМ, $q=1-p$.

После этого по формуле полной вероятности можно определить вероятность выдачи результата диагностирования для текущей структуры и состояния ВС в любой момент времени:

$$P_{op} = \sum_{i=2}^{n-1} C_n^i \cdot p^i \cdot q^{n-i} \cdot \frac{C_i}{C_n} = \sum_{i=2}^{n-1} C_i \cdot p^i \cdot q^{n-i} \quad (6)$$

Одной из главных задач оперативного самодиагностирования является определение момента времени начала выполнения алгоритма. По мере проведения элементарных проверок в системе, вероятность выдачи результата самодиагностирования P_{BP} согласно (6) возрастает. Таким образом каждой структуре проверочных связей будет соответствовать свое значение P_{BP} . В общем случае можно оп-

ределить такое значение P_{BR} , равное P_{OPT} , при котором следует прекратить выполнение элементарных проверок в системе и начать обрабатывать синдром, то есть выполнять алгоритм самодиагностирования. Следовательно, время начала алгоритма диагностирования определяется согласно следующему выражению:

$$t_{нач. диаг.} = t\{P_{BR} > P_{OPT}\}. \quad (7)$$

Значение P_{OPT} находится из условия минимума времени выполнения всей процедуры самодиагностирования.

Алгоритм диагностирования будет проводить тот вычислительный модуль, который раньше других установит выполнение условия (7). При этом вся диагностическая информация поступает в данный модуль на основе способа условной передачи результатов элементарных проверок.

Можно доказать, что при таком способе передачи информации исправные вычислители будут иметь количество информации больше, чем неисправные и алгоритм будет проводиться одним из исправных ВМ. Этим решается одна из главных и трудных задач при реализации самодиагностирования – определение ВМ, которому можно доверять и на который следует возложить функции проведения алгоритма и выдачи результатов.

Особенности анализа диагностической информации для распознавания отказовой ситуации

Заключительным этапом оперативного самодиагностирования является выполнение дешифрации синдрома. Предлагается использовать вероятностный алгоритм самодиагностирования, учитывающий априорные вероятности исправного состояния ВМ системы.

После выполнения алгоритма самодиагностирования возможны два исхода:

- ВМ выдает результат технического состояния системы;
- ВМ не выдает состояние системы, при этом выдается команда на продолжение накопления элементарных проверок.

После выдачи результата самодиагностирования осуществляется восстановление работоспособности системы путем отключения из системы неисправного вычислительного модуля и возложения решаемых им задач на оставшиеся исправ-

ные модули. После этого вся вычислительная система продолжает функционировать по назначению и, параллельно, выполняется оперативное самодиагностирование с меньшим числом ВМ.

Выводы

Предлагаемая стратегия оперативного самодиагностирования может найти применение не только в ВС подвижных объектов, но и в любых вычислительных системах, состоящих из большого числа модулей, способных выполнять проверки друг друга. Выполнение оперативного самодиагностирования в этих системах позволит:

- обеспечить максимальную живучесть ВС и ее системы диагностирования, которая будет способна обнаруживать неисправности при отказах в самих средствах контроля за счет использования «блуждающего» ядра;
- повысить готовность ВМ к выполнению основных функций за счет диагностирования их технического состояния во время функционирования по назначению;
- уменьшить время между моментом возникновения неисправности и моментом ее обнаружения за счет постоянного участия модулей в процедуре диагностирования;
- обеспечить возможность задания требуемой достоверности результатов диагностирования ВС и ее достижение за счет постоянного отслеживания структуры проверочных связей и текущего синдрома.

Список литературы

1. Машков В.А. Самодиагностирование бортовых вычислительных систем. – К.: Изд-во КВВАИУ, 1989. – 84 с.
2. Preperata F.P., Metze G., Chien H.T. On the connection assignment problem of diagnosable systems. – IEEE Trans. Electron. Comput., 1967. EC-16, №12, – P. 848-854.
3. Машков В.А., Барабаш О.В. Организация самоконтроля многомодульных систем на основе оптимальных структур проверочных связей // Электронное моделирование, №3. 1995. Том 17. – С.68-75.
4. Коваленко А.Е., Гула В.В. Отказоустойчивые микропроцессорные системы. – К.: Техніка, 1986. – 150 с.