УДК 004.052.32

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА САМОДИАГНОСТИКИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ АКТИВНОЙ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

С. В. Скворцов, д.т.н., профессор РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-9495-4953, e-mail: s.v.skvor@gmail.com
В. И. Хрюкин, к.т.н., доцент РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-7736-115X, e-mail: vi_x@mail.ru
Т. С. Скворцова, к.т.н., старший преподаватель Академии ФСИН России, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-7504-5973, e-mail: t.s.skvortsova@yandex.ru

Рассматривается задача оптимизации процесса самодиагностики вычислительных модулей многопроцессорной системы при организации ее активной отказоустойчивости. ***Целью работы*** *является разработка подхода к организации взаимных проверок работоспособности вычислительных модулей системы для определения ее технического состояния. Показано, что задача сводится к построению диагностического графа, который описывает множество проверок, выполняемых в цикле контроля системы. Предложена процедура синтеза диагностического графа с экстремальными характеристиками, которая сводится к поиску наименьшего покрытия и обеспечивает минимизацию количества выполняемых проверок модулей или сокращение суммарных вычислительных затрат при организации активной отказоустойчивости многопроцессорной системы. При получении диагностического графа обеспечивается такая мера отказоустойчивости многопроцессорной системы, которая должна достигаться в рамках заданной диагностической модели, применяемой при дешифрации результатов взаимных проверок вычислительных модулей.*

Ключевые слова: *многопроцессорная система, отказоустойчивость, техническое состояние, таблица функций неисправностей, диагностический граф, элементарная проверка, мера диагностируемости, модель структурной диагностики.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-79-49-55

Введение

Одной из основных формальных моделей, применяемых при организации автоматических способов контроля и диагностики отказоустойчивых многопроцессорных систем на структурном уровне, является диагностический граф (ДГ) [1], который описывает множество элементарных проверок (ЭП) [2, 3] и их результатов, позволяющих установить техническое состояние вычислительных модулей (ВМ) в режиме реального времени.

В классическом определении [4] ДГ представляется как ориентированный граф вида $H=(U,\ T)$, вершинам $U = \{u_1, u_2, ..., u_n\}$ которого сопоставлено множество ВМ системы, а дуги задают пары модулей, выполняющих ЭП. Каждая дуга $(u_i,\ u_j) \in T$ взвешена булевым значением $s_{ij} \in \{0,\ 1\}$ результата ЭП, в которой ВМ u_i является контролирующим, а u_j – контролируемым. Набор величин s_{ij}, сформированный на каждом очередном цикле контроля, называется синдромом S системы. Его декодирование производится на основе некоторой диагностической модели [4, 5] и обеспечивает выявление неисправных модулей многопроцессорной системы.

Диагностическая модель задает взаимосвязь результатов попарной проверки ВМ с учетом их состояний (r – исправен, f – отказал) и представляется четверкой логических переменных (s_{rr}, s_{rf}, s_{fr}, s_{ff}), где первый индекс определяет состояние проверяющего ВМ, а второй – проверяемого модуля. Множеством возможных значений любой из четырех указанных величин является $\{0,1,x\}$, где значение $x \in \{0,1\}$ описывает неизвестный результат ЭП.

Заметим, что для дешифрации синдрома достаточно часто применяют модели *PMC* [4] и *BGM* [5], соответственно обозначаемые как $(0,\ 1,\ x,\ x)$ и $(0,\ 1,\ x,\ 1)$.

В работе рассматривается задача получения диагностического графа, имеющего наилучшие характеристики по некоторому критерию (например, общее число ребер, соответствующих выполняемым ЭП, или суммарная стоимость ЭП в цикле контроля при их неравноценности) в рамках используемой диагностической модели.

Анализ и постановка задачи

Далее предполагается, что рассматриваются только устойчивые неисправности, когда ВМ является работоспособным или отказавшим. Также будем считать, что для выполнения системой заданных функций необходимо, чтобы не менее m, где $m < n$, ВМ находились в рабочем состоянии. Другими словами, в процессе функционирования многопроцессорной системы допускается не более $z = n - m$ одновременно неисправных ВМ, где число z называется степенью отказоустойчивости [2].

Все множество состояний системы, каждое из которых задает определенное подмножество неисправных ВМ, обозначим как $\Phi = F(0) \cup F(1) \cup ... \cup F(z)$. Здесь множество $F(k)$ включает все подмножества из Ф, соответствующие k ($k = \overline{0, z}$) отказавших модулей.

Очевидно, что $F(0) = \{F_1^{(0)}\}$, причем $F_1^{(0)} = \varnothing$ характеризует работоспособное (исправное) состояние. Это значит, что $F(k) = \{F_l^{(k)}\}$, где $k = \overline{1, z}$ и $l = \overline{1, C_n^k}$, определяют неисправные состояния системы в целом, а суммарное число всех возможных состояний равно $|\Phi| = 1 + C_n^1 + C_n^2 + ... + C_n^z$, где C_n^k – число сочетаний из n по k.

Мера параллельной диагностируемости системы определяется как количество $\delta \le z$ отказавших модулей, выявляемых путем декодирования синдрома S без восстановления работоспособности отдельных ВМ. Значение δ зависит от используемой модели (например, *PMC* или *BGM*) и структуры связей диагностического графа.

В свою очередь, для многопроцессорных систем множество ребер ДГ формируется с учетом используемой дисциплины активной защиты [6, 7]. Например, пусть для многопроцессорной системы с магистральной организацией неприоритетная дисциплина с переназначением модулей [7] для $n = 5$, $m = 3$ имеет распределение функций ВМ по 5 тактам одного цикла контроля, представленное в таблице 1. Тогда порождаемый ДГ $H = (U,\ T)$ имеет вид, показанный на рисунке 1, *а*.

В работе [8] показано, что асимметричность моделей *PMC* и *BGM* противоречит идее организации активной отказоустойчивости с точки зрения интерпретации результатов ЭП, и предложено использовать симметричные диагностические модели $(0,\ 1,\ 1,\ 1)$ и $(0,\ 1,\ 1,\ x)$. Это существенно повышает меру δ диагностируемости системы при сохранении общего количества ЭП и позволяет использовать неориентированный ДГ $G = (U,\ D)$ для описания синдрома системы. Применение ДГ G, в свою очередь, расширяет число возможных дисциплин активной отказоустойчивости в магистрально-модульных системах, так как для ребра $[u_i,\ u_j] \in D$ не требуется задавать контролирующий и контролируемый ВМ.

Таблица 1 – Распределение функций ВМ по тактам одного цикла контроля
Table 1 – Distribution of computing modules functions by phases of one control cycle

Такт контроля	Назначение вычислительных модулей системы		
	Основные	Дополнительные	Пары ВМ, реализующие ЭП
1	$u_1,\ u_2,\ u_3$	$u_4,\ u_5$	$\{u_5,\ u_1\},\ \{u_4,\ u_2\}$
2	$u_2,\ u_3,\ u_4$	$u_5,\ u_1$	$\{u_1,\ u_2\},\ \{u_5,\ u_3\}$
3	$u_3,\ u_4,\ u_5$	$u_1,\ u_2$	$\{u_2,\ u_3\},\ \{u_1,\ u_4\}$
4	$u_4,\ u_5,\ u_1$	$u_2,\ u_3$	$\{u_3,\ u_4\},\ \{u_2,\ u_5\}$
5	$u_5,\ u_1,\ u_2$	$u_3,\ u_4$	$\{u_4,\ u_5\},\ \{u_3,\ u_1\}$

Нетрудно заметить, что ДГ, порождаемые различными дисциплинами активной отказоустойчивости при фиксированном значении $z = n - m$, отличаются числом выполняемых ЭП, временем формирования (в тактах контроля) [6, 7], а также мерой диагностируемости δ (для разных моделей структурной диагностики). В связи с этим является актуальной задача синтеза графа $G = (U, D)$ с минимальным числом связей $|D| \to min$, дешифрация которого в рамках заданной диагностической модели обеспечивает необходимое значение меры диагностируемости $\delta \le z$. В качестве примера на рисунке 1, *б* приведен диагностический граф с минимально возможным количеством ребер, сформированный на основе симметричной модели (0, 1, 1, 1) для случая $n = 5$ и $\delta = 2$.

а (a) **б (b)**

Рисунок 1 – Диагностические графы с минимальным числом связей при $n = 5$ и $\delta = 2$: а – для модели *PMC*; б – для модели (0, 1, 1, 1)
Figure 1 – Diagnostic graphs with a minimum number of edges with $n = 5$, $\delta = 2$: a – for diagnostic model *PMC*; b – for diagnostic model (0, 1, 1, 1)

Если выполнение ЭП неравноценно по затратам вычислительных ресурсов (машинное время, приоритеты дублируемых задач и контролируемых ВМ, пропускная способность магистралей системы и т.п.), то практический интерес представляет более общая форма задачи: синтез ДГ $G = (U, D)$ по критерию стоимости, где каждому ребру $[u_p, u_q] \in D$ сопоставляется некоторая суммарная оценка $c_{pq} \ge 0$ затрат на реализацию соответствующей ЭП.

Оптимизация процесса самодиагностики

Сформулированную задачу можно решить на основе следующей формальной процедуры, содержащей два этапа.

Этап 1 включает выбор используемой дисциплины активной отказоустойчивости, на основе которой выполняется синтез исходного, возможно избыточного, диагностического графа $G^* = (U, D^*)$, гарантирующего требуемый уровень диагностируемости $\delta \le z$.

На этапе 2 граф G^* модифицируется с целью удаления избыточных ребер, имеющих наибольшую общую стоимость. Заметим, что частным случаем рассмотренной задачи является определение наименьшего общего числа ребер ДГ при $c_{pq} = 1$ для всех $[u_p, u_q] \in D^*$.

Для определения структуры ДГ $G^* = (U, D^*)$ применяется логическая таблица функций неисправностей системы [2], описываемая матрицей $T = [\tau_{ij}]_{h \times g}$, где $h = |\Phi|$ и $g = |D^*|$, в которой каждая строка определяет одно из возможных состояний $F_l^{(k)}$ и содержит соответствующее значение синдрома $S(F_l^{(k)})$. Формирование такой таблицы производится в рамках выбранной диагностической модели для заданного значения δ, причем известно [1], что если все строки попарно различимы, то можно однозначно выполнить дешифрацию синдрома и установить текущее техническое состояние системы (в противном случае должна быть выбрана другая дисциплина или диагностическая модель).

Модификация диагностического графа, направленная на достижение его оптимальных характеристик, производится с использованием следующей процедуры.

Шаг 1. Производится нумерация ребер $[u_p,\ u_q] \in D^*$ исходного графа G^* с учетом последовательности столбцов матрицы Т так, чтобы каждому столбцу l соответствовали ребро $d_l = [u_p,\ u_q]$ и параметры элементарной проверки, т.е. результат $s_l = s_{pq}$ и стоимость $c_l = c_{pq}$.

Шаг 2. Формируется матрица $R = [r_{kl}]_{b\times g}$ попарного сравнения строк таблицы функций неисправностей. Число строк этой матрицы $b = |\Omega|$ определяется множеством всех пар возможных состояний системы $\Omega \subset \Phi \times \Phi$, где

$$\Omega = \{\sigma_k = (F_i^{(v)}, F_j^{(w)}): i \neq j;\ v \neq w;\ v,\ w = \overline{0,\delta};\ i = \overline{1, C_n^v};\ j = \overline{1, C_n^w}\}.$$

Шаг 3. Вычисляются значения элементов матрицы R по следующему правилу:

$$r_{kl} = \begin{cases} \tau_{il} \oplus \tau_{jl}, \text{если} \quad \tau_{il} \in \{0,1\} \ \text{и} \ \tau_{jl} \in \{0,1\}; \\ 0 \quad - \quad \text{при} \quad \tau_{il} = x \ \text{или} \ \tau_{jl} = x, \end{cases}$$

где $i = \overline{1,h}$, $j = \overline{1,h}$, $i \neq j$ и $l = \overline{1,g}$, а символ $\oplus$ обозначает операцию сложения по модулю два.

Шаг 4. Совпадающие строки матрицы R объединяются. В итоге получаем, что единичные элементы каждого столбца $d_l \in D^*$ матрицы R задают подмножество

$$\Lambda_l = \{\sigma_k: r_{kl} = 1;\ k = \overline{1, b}\}$$

пар состояний, которые отличаются, по крайней мере, результатом одной ЭП.

Шаг 5. Для всех столбцов матрицы R формируется множество $\Lambda^* = \{\Lambda_1,\ \Lambda_2,\ ...,\ \Lambda_g\}$, и задача синтеза ДГ $G = (U,\ D)$ по критерию минимальной стоимости, где $D \subseteq D^*$, сводится к поиску подмножества $\Lambda \subseteq \Lambda^*$, для которого достигается минимум целевой функции

$$min\,\varphi = \sum_{l=1}^{g} c_l \xi_l$$

при ограничениях вида

$$\sum_{l=1}^{g} \varepsilon_{kl}\xi_l \geq 1 \ (k = \overline{1,b}),$$

где целочисленные переменные ε_{kl} и ξ_l $(k = \overline{1,b};\ l = \overline{1,g})$ могут принимать значения:

$$\varepsilon_{kl} = \begin{cases} 1, \text{ если } \sigma_k \in \Lambda_l; \\ 0, \text{ если } \sigma_k \notin \Lambda_l; \end{cases} \quad \xi_l = \begin{cases} 1, \text{ если } \Lambda_l \in \Lambda; \\ 0, \text{ если } \Lambda_l \notin \Lambda. \end{cases}$$

Таким образом, представленная процедура производит синтез диагностического графа с экстремальными характеристиками путем перехода к решению (на шаге 5) задачи поиска покрытия наименьшей стоимости [9] матрицы R, т.е. такого множества столбцов в матрице R с минимальной суммарной стоимостью, что каждая строка содержит единицу хотя бы в одном из выбранных столбцов.

Пример

В качестве примера рассмотрим два варианта матрицы Т, представленные в таблице 2 и составленные при $n = 5$, $m = 3$, $\delta = 2$ в рамках моделей *PMC* и (0, 1, 1, 1) для ДГ $H = (U,\ T)$ и $G^* = (U,\ D^*)$ соответственно, которые порождаются одной дисциплиной активной отказоустойчивости (таблица 1).

Граф H показан на рисунке 1, *а* и имеет минимальное число связей, структура G^* является идентичной, если не учитывать направленность дуг. Искомый граф $G = (U,\ D)$, полученный для $\delta = 2$ в результате решения задачи поиска наименьшего покрытия при равной стоимости всех ребер, показан на рисунке 1, *б* и порождается дисциплиной активной отказоустойчивости, в которой два цикла контроля (в каждом из которых синдром полностью обновляется) реализуются за 5 тактов (таблица 3). В случае $\delta = 1$ оптимальный ДГ G получается дальнейшим исключением любого ребра из D (рисунок 1, *б*) и формируется в цикле контроля из 2 тактов (таблица 4).

Таблица 2 – Варианты таблицы функций неисправностей при $n = 5$ и $\delta = 2$
Table 2 – Fault function table versions for $n = 5$, $\delta = 2$

Допустимые состояния $F_l^{(k)} \in \Phi$	Значения синдрома $S = (s_{12}, s_{14}, s_{23}, s_{25}, s_{31}, s_{34}, s_{42}, s_{45}, s_{51}, s_{53})$																			
	Модель *PMC*										Модель (0, 1, 1, 1)									
	s_{12}	s_{14}	s_{23}	s_{25}	s_{31}	s_{34}	s_{42}	s_{45}	s_{51}	s_{53}	s_{12}	s_{14}	s_{23}	s_{25}	s_{31}	s_{34}	s_{42}	s_{45}	s_{51}	s_{53}
$F_1^{(0)} = \varnothing$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$F_1^{(1)} = \{m_1\}$	x	x	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
$F_2^{(1)} = \{m_2\}$	1	0	x	x	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
$F_3^{(1)} = \{m_3\}$	0	0	1	0	x	x	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1
$F_4^{(1)} = \{m_4\}$	0	1	0	0	0	1	x	x	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
$F_5^{(1)} = \{m_5\}$	0	0	0	1	0	0	0	1	x	x	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
$F_1^{(2)} = \{m_1, m_2\}$	x	x	x	x	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
$F_2^{(2)} = \{m_1, m_3\}$	x	x	1	0	x	x	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1
$F_3^{(2)} = \{m_1, m_4\}$	x	x	0	0	1	1	x	x	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0
$F_4^{(2)} = \{m_1, m_5\}$	x	x	0	1	1	0	0	1	x	x	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1
$F_5^{(2)} = \{m_2, m_3\}$	1	0	x	x	x	x	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1
$F_6^{(2)} = \{m_2, m_4\}$	1	1	x	x	0	1	x	x	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
$F_7^{(2)} = \{m_2, m_5\}$	1	0	x	x	0	0	1	1	x	x	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1
$F_8^{(2)} = \{m_3, m_4\}$	0	1	1	0	x	x	x	x	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1
$F_9^{(2)} = \{m_3, m_5\}$	0	0	1	1	x	x	0	1	x	x	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
$F_{10}^{(2)} = \{m_4, m_5\}$	0	1	0	1	0	1	x	x	x	x	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1

Таблица 3 – Оптимальное распределение функций ВМ по тактам циклов контроля для диагностической модели (0, 1, 1, 1) при $n = 5$, $m = 3$ и $\delta = 2$
Table 3 – Optimal distribution of computing modules functions by phases of control cycles for diagnostic model (0, 1, 1, 1) with $n = 5$, $m = 3$, $\delta = 2$

Такт контроля	Назначение вычислительных модулей системы		
	Основные	Дополнительные	Пары ВМ, реализующие ЭП
1	u_1, u_2, u_3	u_4, u_5	$\{u_5, u_1\}$, $\{u_4, u_3\}$
2	u_2, u_3, u_4	u_5, u_1	$\{u_1, u_2\}$, $\{u_5, u_4\}$
3	u_3, u_4, u_5	u_1, u_2	$\{u_2, u_3\}$, $\{u_1, u_5\}$
4	u_4, u_5, u_1	u_2, u_3	$\{u_3, u_4\}$, $\{u_2, u_1\}$
5	u_5, u_1, u_2	u_3, u_4	$\{u_4, u_5\}$, $\{u_3, u_2\}$

Таблица 4 – Оптимальное распределение функций ВМ в трех циклах контроля для диагностической модели (0, 1, 1, 1) при $n = 5$, $m = 3$ и $\delta = 1$
Table 4 – Optimal distribution of computing modules functions by control cycles for diagnostic model (0, 1, 1, 1) with $n = 5$, $m = 3$, $\delta = 1$

Цикл контроля	Такт контроля	Назначение вычислительных модулей системы		
		Основные	Дополнительные	Пары ВМ, реализующие ЭП
1	1	u_1, u_2, u_3	u_4, u_5	$\{u_5, u_1\}$, $\{u_4, u_3\}$
	2	u_2, u_3, u_4	u_5, u_1	$\{u_1, u_2\}$, $\{u_5, u_4\}$
2	1	u_3, u_4, u_5	u_1, u_2	$\{u_2, u_3\}$, $\{u_1, u_5\}$
	2	u_4, u_5, u_1	u_2, u_3	$\{u_3, u_4\}$, $\{u_2, u_1\}$
3	1	u_5, u_1, u_2	u_3, u_4	$\{u_4, u_5\}$, $\{u_3, u_2\}$
	2	u_1, u_2, u_3	u_4, u_5	$\{u_5, u_1\}$, $\{u_4, u_3\}$

Заключение

В качестве выводов по работе необходимо указать, что предложенный подход к синтезу диагностического графа имеет следующие особенности:

– является универсальным относительно диагностической модели (асимметричной или симметричной), которая применяется для дешифрации синдрома;

– может использоваться для минимизации как числа ребер диагностических графов (ориентированных и неориентированных), так и общих вычислительных затрат при выполнении элементарных проверок в рамках выбранных дисциплин активной защиты.

При этом качество решения задачи синтеза существенно зависит от эффективности алгоритмов поиска наименьшего покрытия, некоторые из которых можно найти в работе [9].

Библиографический список

1. **Димитриев Ю. К., Хорошевский В. Г.** Вычислительные системы из миниЭВМ / под ред. Э. В. Евреинова. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.

2. Основы технической диагностики. В 2-х книгах. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / под ред. **П. П. Пархоменко**. М.: Энергия, 1976. 464 с.

3. **Крамаренко М. Б.** Модели диагностирования отказов параллельной вычислительной системы // Электронное моделирование. 1989. № 3. С. 60-65.

4. **Preparata F. P., Metze G., Chien R. T.** On the Connection Assignment Problem of Diagnosable Systems. IEEE Trans. Electron. Comput. 1967, vol. EC-16, no. 6, pp. 848-854.

5. **Barsi F., Grandoni F., Maestrini P.** A Theory of Diagnosability of Digital Systems // IEEE Trans. Comput. 1976, vol. C-25, no. 6, pp. 585-593.

6. **Гершанов В. И., Скворцов С. В., Телков И. А.** Методы повышения отказоустойчивости вычислительных систем, основанных на принципе ассоциативной селекции потоков данных // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. 1992. Вып. 7. С. 50-58.

7. **Скворцов С. В.** Организация отказоустойчивых вычислений в магистрально-модульных многопроцессорных системах // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 1996. № 1. С. 27-32.

8. **Скворцов С. В., Скворцов Н. В.** Выбор диагностических моделей для организации активной отказоустойчивости многопроцессорных систем // Новые информационные технологии: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТА, 1997. С. 55-61.

9. **Кристофидес Н.** Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.

UDC 004.052.32

SELF-DIAGNOSIS PROCESS OPTIMIZATION FOR MULTIPROCESSOR SYSTEMS WITH ACTIVE FAULT TOLERANCE

S. V. Skvortsov, Dr. Sc. (Tech.), full professor, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-9495-4953, e-mail: s.v.skvor@gmail.com
V. I. Khryukin, Ph.D. (Tech.), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-7736-115X, e-mail: vi_x@mail.ru
T. S. Skvortsova, Ph.D. (Tech.), senior lecturer, Academy of the FPS of Russia, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-7504-5973, e-mail: t.s.skvortsova@yandex.ru

The task of self-diagnosis process optimization for multiprocessor systems with active fault tolerance is considered. ***The aim of the work*** *is to develop an approach to the organization of mutual failure checks of computing units to determine technical condition of a system. It is shown that the task is reduced to constructing a diagnostic graph that describes a set of unit checks performed in system control cycle. A procedure to synthesize a diagnostic graph with extreme characteristics is proposed being reduced to finding the cover of a Boolean matrix and minimizes the number of unit checks or reduces total computational costs in*

case of active fault tolerance of a multiprocessor system. When obtaining a diagnostic graph, such fault tolerance measure of multiprocessor system is provided which should be achieved for a given structural diagnostics model used in decrypting the results of mutual failure checks of system units.

***Key words**: multiprocessor system, fault tolerance, technical condition, fault function table, diagnostic graph, unit check, diagnosability measure, structural diagnostics model.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-79-49-55

References

1. **Dimitriev Ju. K., Horoshevskij V. G.** *Vychislitel'nye sistemy iz miniEVM.* (Computing systems from minicomputers). Pod red. Je.V. Evreinova. Moscow, Radio i svjaz', 1982, 304 p. (in Russian).

2. *Osnovy tekhnicheskoj diagnostiki* (The basics of technical diagnostics). V 2-h knigah. Kn. 1. Modeli obektov, metody i algoritmy diagnoza (Object models, methods and algorithms of diagnosis) / pod red. **P. P. Parhomenko**. Moscow, Jenergija, 1976, 464 p. (in Russian).

3. **Kramarenko M. B.** Modeli diagnostirovanija otkazov parallel'noj vychislitel'noj sistemy. *Jelektronnoe modelirovanie*. 1989, no. 3, pp. 60-65 (in Russian).

4. **Preparata F. P., Metze G., Chien R. T.** On the Connection Assignment Problem of Diagnosable Systems. *IEEE Trans. Electron. Comput.* 1967, vol. EC-16, no. 6, pp. 848-854.

5. **Barsi F., Grandoni F., Maestrini P.** A Theory of Diagnosability of Digital Systems. *IEEE Trans. Comput.* 1976, vol. C-25, no. 6, pp. 585-593.

6. **Gershanov V. I., Skvortsov S. V., Telkov I. A.** Metody povyshenija otkazoustojchivosti vychislitel'nyh sistem, osnovannyh na principe associativnoj selekcii potokov dannyh. *Voprosy radiojelektroniki. Serija jelektronnaja vychislitel'naja tehnika.* 1992, no. 7, pp. 50-58 (in Russian).

7. **Skvortsov S. V.** Organizacija otkazoustojchivyh vychislenij v magistral'no-modul'nyh mnogoprocessornyh sistemah. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 1996, no. 1, pp. 27-32 (in Russian).

8. **Skvortsov S. V., Skvortsov N. V.** Vybor diagnosticheskih modelej dlja organizacii aktivnoj otkazoustojchivosti mnogoprocessornyh system. *Novye informacionnye tehnologii: Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov*. Rjazan', RGRTA, 1997, pp. 55-61 (in Russian).

9. **Kristofides N.** *Teorija grafov. Algoritmicheskij podhod*. (Graph theory. Algorithmic approach), Moscow, Mir, 1978, 432 p. (in Russian).