

ФРАГМЕНТНЫЙ ПОДХОД К ДИАГНОСТИРОВАНИЮ КОМПОНЕНТОВ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ СО СТРУКТУРОЙ МИНИМАЛЬНОГО КВАЗИПОЛНОГО ГРАФА (НА ПРИМЕРЕ ГРАФА РАЗМЕРА 7×7)

Ведешенков В. А.¹

*(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)*

Разработано два варианта фрагментного подхода, различающиеся составом диагностируемых фрагментов. В первом варианте ЦС логически разделяется на 7 фрагментов одинакового состава: коммутатор, 4 абонента и 8 линий связи. Во втором варианте 7 абонентов проверяются по одному, каждый фрагмент включает коммутатор и 8 линий связи. Исправный диагностический монитор (ДМ) поочередно проверяет компоненты фрагмента, раскодировывает полученный синдром проверок, передает диагноз обслуживающему персоналу для ремонта неисправных компонентов. Представленный фрагментный подход можно использовать для диагностирования компонентов ЦС аналогичной структуры с другими параметрами.

Ключевые слова: цифровая система, абонент, коммутатор, линия связи, фрагментный подход, раскодирование.

1. Введение

В настоящей работе под цифровыми системами (ЦС) понимаются модели многомашинных или многопроцессорных

¹ Виктор Алексеевич Ведешенков, доктор технических наук, старший научный сотрудник (vva@ipu.ru, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, тел. (495) 334-75-90).

вычислительных систем, отражающие необходимые диагностические свойства и параметры анализируемых вычислительных систем.

Минимальный квазиполный граф образуется на основе однородного двудольного графа, одну долю которого составляют коммутаторы $t \times t$, а другую – t -портовые абоненты. Значение t выбирается минимальным, при котором любые два узла в одной доле связаны σ путями длины два через разные узлы в другой доле. В одной доле имеется n коммутаторов, а в другой – n абонентов. Каждый такой путь проходит через один коммутатор, и разные пути проходят через разные коммутаторы. Для рассматриваемых топологий параметры n и t связаны соотношением $n = t(t - 1)/\sigma + 1$ и не могут быть взяты произвольно [6, 7, 8]. Пример такого графа размера 7×7 с двумя путями между двумя абонентами приведен на рис. 1 для $n = 7$, $t = 4$, $\sigma = 2$.

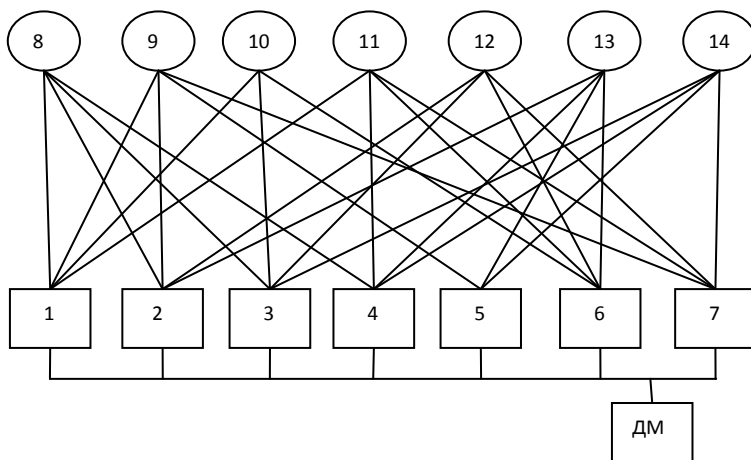


Рис. 1. Схема цифровой системы со структурой минимального квазиполного графа $S_{7,4,2}$ размера 7×7 с двумя путями между двумя абонентами: 1-7 – абоненты; 8-14 – коммутаторы; ДМ – диагностический монитор

В числе возможных областей применения графов с подобной новой структурой называют отказоустойчивые многомашинные вычислительные системы (МВС) реального времени, где, например, подмножество вершин одной доли представляет совокупность процессорных элементов или вычислительных машин, а подмножество вершин другой доли – коммутаторы [9, 10].

Экспериментально установлено, что предложенный в [2, 3] подход к диагностированию неисправных компонентов ЦС со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7 с двумя путями между двумя абонентами обеспечивает достоверность однократного (без ремонта) диагностирования не больше, чем:

- двух неисправных абонентов и двух неисправных коммутаторов при исправном состоянии всех линий связи, или
- одного неисправного абонента и трёх неисправных коммутаторов при исправном состоянии всех линий связи, или
- двух неисправных линий связи при исправном состоянии всех абонентов и коммутаторов.

Одной из основных причин, определяющих значения установленных оценок достоверных результатов, является то, что диагностический тест построен для одновременной идентификации (без ремонта) неисправных компонентов всей анализируемой ЦС.

Альтернативным для подхода из [2, 3] является подход, в котором диагностические процедуры выполняются над частью (фрагментом) всей ЦС. В дальнейшем предполагается, что неисправности компонентов ЦС таковы, что прекращают работу тех компонентов, в которых они возникли, и не влияют на работоспособность других компонентов. Такая предпосылка гарантирует достоверность результатов диагностирования – подозреваются в неисправности только те компоненты, которые находятся в составе тестируемого фрагмента, так как компоненты других фрагментов не влияют на работоспособность компонентов этого фрагмента.

В статье разработан фрагментный подход к диагностированию неисправных компонентов ЦС рассматриваемой структуры, позволяющий увеличить

количество однозначно диагностируемых неисправных компонентов.

2. Постановка задачи

Исходная МВС со структурой минимального квазиполного графа представлена диагностическим графом, у которого n вершин одной доли представляют абоненты (процессоры) системы, n вершин другой доли – коммутаторы.

Будем считать, что допускаются устойчивые кратные отказы компонентов (абонентов, коммутаторов, линий связи), причем неисправности компонентов таковы, что прекращают работу тех компонентов, в которых они возникли, и не влияют на работоспособность других компонентов.

Организацией процессов диагностирования в различных фрагментах ЦС и обработкой полученных результатов занимается исправный диагностический монитор (ДМ) (в терминологии А. Авижениса [1, стр. 13] – «обслуживающая мини-ЭВМ, исполняющая контрольные программы с целью наблюдения за работой остальной части системы»). ДМ находится в модуле, внешнем по отношению к диагностируемой ЦС [1].

Требуется разработать фрагментный подход к диагностированию (с ремонтом) неисправных компонентов анализируемой ЦС, однозначно идентифицирующий хотя бы один неисправный компонент.

3. Фрагментный подход к диагностированию неисправных компонентов ЦС со структурой минимального квазиполного графа (вариант 1)

Для проверки работоспособности компонента с предполагаемым характером функционирования (работа–отказ) со стороны проверяющего модуля достаточно послать к нему запрос, на который проверяемый компонент должен дать ответ в течение заданного интервала времени Δt . Отсутствие

ответа в течение интервала Δt является признаком проявления (обнаружения) неисправности компонента.

Предположение о том, что возникшие неисправности компонентов не влияют на работоспособность других компонентов, позволяет считать, что неисправные компоненты обнаруживаются только на тех проверках, которые построены для тестирования этих компонентов. Функции контролирующего теста состоят в том, чтобы проверить каждый компонент анализируемой системы хотя бы один раз.

Еще один постулат теории диагностики: длина диагностического теста, однозначно идентифицирующего неисправные компоненты, уменьшается с уменьшением общего количества диагностируемых компонентов. Но для достоверного диагностирования даже одиночных неисправных компонентов необходимо, чтобы каждый компонент тестировался не менее чем в двух проверках.

Для реализации фрагментного подхода разделим ЦС со структурой минимального квазиполного графа размера $n \times n$ на фрагменты одинаковой структуры и состава. В качестве такого фрагмента выберем подсистему, включающую 1 коммутатор, m абонентов, связанных с данным коммутатором, и $2m$ линий связи между данным коммутатором и m абонентами. Поскольку в ЦС n коммутаторов, то ЦС разделяется на n фрагментов, связанных через общие абоненты. Таким образом, процесс диагностирования всей ЦС разделяется на n этапов диагностирования одного (очередного) фрагмента.

Контроль и диагностирование компонентов каждого фрагмента ЦС организуем следующим образом. Вначале выполняется контролирующий тест фрагмента. Если этот тест «проходит» успешно – не обнаруживает неисправностей, то выполняется переход к контролю следующего фрагмента. Если же тест не «проходит», то выполняется переход к диагностированию неисправных компонентов во фрагменте, на котором не «прошел» контролирующий тест. Если в результате диагностирования однозначно идентифицируется хотя бы один компонент, подозреваемый в неисправности, то выполняется его восстановление. После восстановления – замены компонента, подозреваемого в неисправности, исправным компонентом –

продолжается контроль остальных фрагментов ЦС. Если результат диагностирования – неоднозначен, то возможны различные действия, которые будут рассмотрены ниже.

Организацию процессов диагностирования в различных фрагментах ЦС и обработку полученных результатов выполняет исправный диагностический монитор (ДМ), имеющий доступ к каждому абоненту.

Одинаковая структура и состав фрагментов позволяют использовать метод и средства диагностирования, разработанные для одного фрагмента, для диагностирования компонентов других фрагментов после соответствующей замены номеров компонентов в таблицах проверок.

Для последующих построений введем в рассмотрение фрагмент той же структуры, что и фрагменты анализируемой ЦС, компоненты которого обозначим номерами 1, ..., 8 – линии связи, 9 – коммутатор, 10, 11, 12, 13 – абоненты. Назовем этот фрагмент унифицированным.

Для контроля и диагностирования технического состояния компонентов этого фрагмента используем 12 проверок, вариант которых показан в таблице 1. По существу каждая проверка $p_{j,i,k}$ контролирует работоспособность начального абонента A_j , коммутатора c_i , конечного абонента A_k и двух соединяющих их линий связи: l_{j-i} и l_{j-i} . Нижний индекс (j, i, k) , используемый в клетках заголовка второго, третьего и четвертого столбцов таблицы 1, состоит из индексов начального абонента, коммутатора и конечного абонента, участвующих в составе проверки данной строки. В клетках четвертого столбца «Оценка $r_{j,i,k}$ » показаны символы r_i , которые заменяются нулем или единицей после выполнения проверки i -й строки таблицы 1.

Например, для проверки $p_{10,9,12}$ в клетке на пересечении первой строки и третьего столбца «Проверяемые подсистемы $U_{j,i,k}$ » записаны номера начального абонента 10, коммутатора 9, конечного абонента 12 и линий связи 1 и 2, входящих в состав подсистемы $U_{10,9,12}$. (Отметим, что в клетках таблицы 1 номера индексов линий связи показаны без символа l .)

Таблица 1. Таблица проверок унифицированного фрагмента

№№ п./п.	Проверка $p_{j,i,k}$	Проверяемые подсистемы $U_{j,i,k}$	Оценка $r_{j,i,k}$
1	$p_{10,9,12}$	10, 1, 9, 2, 12	r_1
2	$p_{12,9,13}$	12, 3, 9, 4, 13	r_2
3	$p_{13,9,11}$	13, 5, 9, 6, 11	r_3
4	$p_{11,9,12}$	11, 7, 9, 2, 12	r_4
5	$p_{12,9,10}$	12, 3, 9, 8, 10	r_5
6	$p_{10,9,11}$	10, 1, 9, 6, 11	r_6
7	$p_{11,9,13}$	11, 7, 9, 4, 13	r_7
8	$p_{13,9,10}$	13, 5, 9, 8, 10	r_8
9	$p_{10,9,13}$	10, 1, 9, 4, 13	r_9
10	$p_{13,9,12}$	13, 5, 9, 2, 12	r_{10}
11	$p_{12,9,11}$	12, 3, 9, 6, 11	r_{11}
12	$p_{11,9,10}$	11, 7, 9, 8, 10	r_{12}

Проверки 9–12 образуют контролирующий тест для унифицированного фрагмента. Нетрудно убедиться, что на этих проверках каждая линия связи этого фрагмента тестируется только один раз, каждый абонент – дважды, а коммутатор – четыре раза, что неизбежно, так как коммутатор входит в каждую проверку.

Двенадцать проверок, показанных в таблице 1, образуют полный тест для контроля работоспособности 12 путей, которые возможны между любой парой из четырех абонентов, связанных с коммутатором 9 с помощью восьми прилегающих линий связи.

Каждая проверка выполняется следующим образом. ДМ передает очередному абоненту A_j команду «Переслать абоненту A_k через коммутатор c_i сообщение о проверке $p_{j,i,k}$ ». Абонент A_k , получив такое сообщение, подтверждает его получение ДМ, который заносит в клетку столбца «Оценка $r_{j,i,k}$ » оценку 0. Если в течение интервала Δt такого подтверждения от абонента A_k не приходит, то ДМ заносит в эту же клетку столбца «Оценка $r_{j,i,k}$ » оценку 1. После записи оценки (0 или 1) ДМ передает

следующему абоненту команду на выполнение очередной проверки.

После выполнения всех 12 проверок в столбце «Оценка $r_{j,i,k}$ » таблицы 1 будет записан 12-разрядный двоичный код, называемый синдромом проверок R_k [11]. Преобразование синдрома R_k в диагноз – номера неисправных и исправных компонентов анализируемой системы – называется раскодированием.

Для построения таблиц проверок, аналогичных таблице 1, для конкретных фрагментов ЦС сформируем таблицы соответствия номеров компонентов унифицированного фрагмента и фрагментов ЦС с коммутаторами 8–14 (показаны в таблицах 2₁ и 2₂).

Для примера в таблице 3 показана таблица проверок для фрагмента с коммутатором 8, построенная на основании записей таблицы 1 и таблицы 2₁.

Таблица 2₁. Таблица соответствия для коммутаторов 8,9,10,11

№ компонента унифици. фрагмента	Номер компонента фрагмента (комм. 8)	Номер компонента фрагмента (комм. 9)	Номер компонента фрагмента (комм. 10)	Номер компонента фрагмента (комм. 11)
1	1–8	1–9	1–10	1–11
2	8–3	9–5	10–5	11–6
3	3–8	5–9	5–10	6–11
4	8–4	9–7	10–6	11–7
5	4–8	7–9	6–10	7–11
6	8–2	9–2	10–3	11–4
7	2–8	2–9	3–10	4–11
8	8–1	9–1	10–1	11–1
9	ком. 8	ком. 9	ком. 10	ком. 11
10	аб. 1	аб. 1	аб. 1	аб. 1
11	аб. 2	аб. 2	аб. 3	аб. 4
12	аб. 3	аб. 5	аб. 5	аб. 6
13	аб. 4	аб. 7	аб. 6	аб. 7

Таблица 2. Таблица соответствия для коммутаторов 12,13,14

Номер компонента унифицир. фрагмента	Номер компонента фрагмента (комм. 12)	Номер компонента фрагмента (комм. 13)	Номер компонента фрагмента (комм. 14)
1	2–12	2–13	3–14
2	12–6	13–5	14–5
3	6–12	5–13	5–14
4	12–7	13–6	14–7
5	7–12	6–13	2–14
6	12–3	13–4	14–4
7	3–12	4–13	4–14
8	12–2	13–2	14–3
9	ком. 12	ком. 13	ком. 14
10	аб. 2	аб. 2	аб. 3
11	аб. 3	аб. 4	аб. 4
12	аб. 6	аб. 5	аб. 5
13	аб. 7	аб. 6	аб. 7

Таблица 3. Таблица проверок (для коммутатора 8)

№№ п/п	Проверка $P_{j,i,k}$	Проверяемые подсистемы $U_{j,i,k}$	Оценка $r_{j,i,k}$
1	$P_{1,8,3}$	1, (1–8), 8, (8–3), 3	r_1
2	$P_{3,8,4}$	3, (3–8), 8, (8–4), 4	r_2
3	$P_{4,8,2}$	4, (4–8), 8, (8–2), 2	r_3
4	$P_{2,8,3}$	2, (2–8), 8, (8–3), 3	r_4
5	$P_{3,8,1}$	3, (3–8), 8, (8–1), 1	r_5
6	$P_{1,8,2}$	1, (1–8), 8, (8–2), 2	r_6
7	$P_{2,8,4}$	2, (2–8), 8, (8–4), 4	r_7
8	$P_{4,8,1}$	4, (4–8), 8, (8–1), 1	r_8
9	$P_{1,8,4}$	1, (1–8), 8, (8–4), 4	r_9
10	$P_{4,8,3}$	4, (4–8), 8, (8–3), 3	r_{10}
11	$P_{3,8,2}$	3, (3–8), 8, (8–2), 2	r_{11}
12	$P_{2,8,1}$	2, (2–8), 8, (8–1), 1	r_{12}

4. Способ раскодирования результатов проверок компонентов ЦС со структурой минимального квазиполного графа (на примере графа размера 7×7)

Для раскодирования результатов проверок и формирования диагноза воспользуемся алгебрологическим методом из [4], являющимся формализацией известного в технической диагностике метода пересечений.

Напомним основные положения этого метода.

А. Обозначим переменной \overline{m}_n исправное состояние компонента с номером n , а переменной m_n – неисправное состояние компонента с номером n , т.е. для этих переменных справедливы логические соотношения:

– компонент n исправен – $\overline{m}_n = 1, m_n = 0$,

– компонент n неисправен – $\overline{m}_n = 0, m_n = 1$.

Функцию технического состояния компонентов с номерами n_1, n_2, \dots, n_k :

– при нулевом результате их проверки тестом p_j (оценка \overline{r}_j) запишем так:

$$\overline{F}_j = \overline{m}_{n_1} \cdot \overline{m}_{n_2} \cdot \dots \cdot \overline{m}_{n_k} \quad (\text{все компоненты исправны}),$$

– при единичном результате их проверки тестом p_j (оценка r_j) запишем так:

$F_j = m_{n_1} \vee m_{n_2} \vee \dots \vee m_{n_k}$ (хотя бы один из компонентов неисправен).

Б. Предлагаемый метод раскодирования результатов тестирования ЦС на множестве проверок p_1, p_2, \dots, p_k состоит из следующих этапов.

1. Для каждого результата \overline{r}_j (r_j) записать функцию \overline{F}_j (F_j), в которую подставить номера компонентов, взятые из состава подсистемы, проверяемой p_j .

2. Построить функцию $\overline{\Phi}$ как конъюнкцию всех функций $\overline{F_j}$.

3. Упростить дизъюнктивные члены функций F_j , вычеркнув те переменные, для которых в функции $\overline{\Phi}$ есть одноименные переменные с отрицанием (с чертой сверху).

4. Построить функцию $\Psi = \Phi \cap \overline{\Phi}$ путем логического умножения оставшихся частей функций F_j и функции $\overline{\Phi}$, выполнить поглощение членов большей длины членами меньшей длины. При этом будут полезны известные формулы:

$$m_n \wedge \overline{m_n} = 0, m_n \vee \overline{m_n} = 1, m_n (m_n \vee m_p) = m_n.$$

5. Выделить из полученного логического выражения члены минимальной длины. Они определяют диагноз – подмножество компонентов, подозреваемых в неисправности по результатам выполненных проверок.

Приведем несколько примеров использования алгебροлогического метода раскодирования результатов проверок. (С целью сокращения объема текста некоторые из производимых операций будем опускать.)

Пусть после выполнения 12 проверок таблицы 1 получен единичный синдром проверок (поскольку здесь и в дальнейшем синдром проверок будет всегда 12-разрядным, то дополнительно разрядность упоминать не будем):

$$R_x = 1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6 1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12},$$

где номер проверки записан в качестве нижнего индекса полученной оценки: 1 или 0. Так как синдром R_x содержит только единичные оценки, то для последующего анализа нужны только функции F_j (показаны ниже):

$$F_1 = (10 \vee 1 \vee 9 \vee 2 \vee 12), F_2 = (12 \vee 3 \vee 9 \vee 4 \vee 13),$$

$$F_3 = (13 \vee 5 \vee 9 \vee 6 \vee 11), F_4 = (11 \vee 7 \vee 9 \vee 2 \vee 12),$$

$$F_5 = (12 \vee 3 \vee 9 \vee 8 \vee 10), F_6 = (10 \vee 1 \vee 9 \vee 6 \vee 11),$$

$$F_7 = (11 \vee 7 \vee 9 \vee 4 \vee 13), F_8 = (13 \vee 5 \vee 9 \vee 8 \vee 10),$$

$$F_9 = (10 \vee 1 \vee 9 \vee 4 \vee 13), F_{10} = (13 \vee 5 \vee 9 \vee 2 \vee 12),$$

$$F_{11} = (12 \vee 3 \vee 9 \vee 6 \vee 11), \quad F_{12} = (11 \vee 7 \vee 9 \vee 8 \vee 10).$$

Поскольку номер 9 входит во все функции F_j , то при логическом умножении функций F_j их общий член (номер 9) выйдет из скобок. Сделаем это сразу при построении функции Ψ_x :

$$\begin{aligned} \Psi_x = & 9 \vee (10 \vee 1 \vee 2 \vee 12) \wedge (12 \vee 3 \vee 4 \vee 13) \wedge \\ & \wedge (13 \vee 5 \vee 6 \vee 11) \wedge (11 \vee 7 \vee 2 \vee 12) \wedge (12 \vee 3 \vee 8 \vee 10) \wedge \\ & \wedge (10 \vee 1 \vee 6 \vee 11) \wedge (11 \vee 7 \vee 4 \vee 13) \wedge (13 \vee 5 \vee 8 \vee 10) \wedge \\ & \wedge (10 \vee 1 \vee 4 \vee 13) \wedge (13 \vee 5 \vee 2 \vee 12) \wedge (12 \vee 3 \vee 6 \vee 11) \wedge \\ & \wedge (11 \vee 7 \vee 8 \vee 10). \end{aligned}$$

После логического умножения, поглощения членов большей длины членами меньшей длины и сокращения подобных членов получим начальную часть функции Ψ_x в следующем виде (здесь и в последующем знаки конъюнкции из начального вида функции заменены точкой):

$$\begin{aligned} (1) \quad \Psi_x = & 9 \vee 10 \cdot 11 \cdot 12 \vee 10 \cdot 11 \cdot 13 \vee 10 \cdot 12 \cdot 13 \vee 11 \cdot 12 \cdot 13 \vee \\ & \vee 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \vee 2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8 \vee 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 8 \vee 1 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 8 \vee \\ & \vee 1 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8 \vee 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 6. \end{aligned}$$

Каждый член функции Ψ_x определяет один из вариантов диагноза: комбинация номеров компонентов, неисправность которых приводит к единичному синдрому R_x . Для пояснения причин полученных результатов раскодирования заменим номера компонентов в (1) символами соответствующих компонентов с теми же номерами. Тогда вместо функции Ψ_x получим диагноз для компонентов унифицированного фрагмента Dz_9 :

$$\begin{aligned} (2) \quad Dz_9 = & c_9 \vee a_{10} \cdot a_{11} \cdot a_{12} \vee a_{10} \cdot a_{11} \cdot a_{13} \vee a_{10} \cdot a_{12} \cdot a_{13} \vee a_{10} \cdot a_{11} \cdot a_{13} \vee \\ & \vee l_1 \cdot l_3 \cdot l_5 \cdot l_7 \vee l_2 \cdot l_4 \cdot l_6 \cdot l_8 \vee l_1 \cdot l_3 \cdot l_5 \cdot l_2 \cdot l_4 \cdot l_8 \vee l_1 \cdot l_3 \cdot l_7 \cdot l_2 \cdot l_6 \cdot l_8 \vee \\ & \vee l_1 \cdot l_5 \cdot l_7 \cdot l_4 \cdot l_6 \cdot l_8 \vee l_3 \cdot l_5 \cdot l_7 \cdot l_2 \cdot l_4 \cdot l_6. \end{aligned}$$

Диагноз Dz_9 , показанный в (2), содержит 11 подмножеств компонентов, подозреваемых в неисправности:

- коммутатор 9;
- или три из четырех абонентов (4 подмножества);
- или четыре входные линии связи: 1, 3, 5, 7
- или четыре выходных линии связи: 2, 4, 6, 8;

– или три входных и три выходных линии связи (6 подмножеств).

Нетрудно найти другие комбинации неисправных абонентов и линий связи, проверка которых дает единичный синдром. Например, продолжение функции Ψ_x из (1) будет содержать такие конъюнкции:

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_x = & 10 \cdot 11 \cdot 4 \cdot 5 \vee 10 \cdot 12 \cdot 4 \cdot 5 \vee 10 \cdot 13 \cdot 2 \cdot 3 \vee \\ & \vee 11 \cdot 12 \cdot 4 \cdot 5 \vee 11 \cdot 13 \cdot 2 \cdot 8 \vee 12 \cdot 13 \cdot 1 \cdot 7. \end{aligned}$$

Способ подбора подобных комбинаций состоит в том, чтобы отбирать очередной член из состава тех проверяемых подсистем, в которых нет ни одного из ранее отобранных членов данной комбинации. Подбор заканчивается тогда, когда в составе всех 12 проверяемых подсистем из таблицы 1 будет хотя бы один компонент из данной комбинации.

Состав конъюнкций из функций Ψ_x и $\Delta\Psi_x$ определяет границы количества неисправных компонентов разных типов, при достижении которых данный способ диагностирования не «работает»: не дает достоверного диагноза хотя бы для одного неисправного компонента.

В таблице 4 приведены результаты диагностирования некоторых характерных отказовых ситуаций, полученные с использованием алгебрологического метода раскодирования синдромов для проверок из таблицы 1.

В левом столбце таблицы 4 показан номер N_k отказовой ситуации, для которой в последующих клетках этой строки приведены соответствующие данные. В столбце «Отказовая ситуация» показаны номера компонентов ситуации N_k (в скобках – количества неисправных абонентов и линий связи в этой ситуации). В следующем столбце записан синдром R_k , полученный после выполнения проверок из таблицы 1, причем (как и ранее) номер проверки записан в качестве нижнего индекса оценки: 1 или 0. Результаты раскодирования синдрома R_k показаны в столбце «Диагноз», краткие примечания к этому диагнозу показаны в последнем столбце.

Анализ записей таблицы 4 позволяет сделать следующие выводы.

Таблица 4. Таблица результатов диагностирования 1

N_k	Отказ. ситуация	Синдром проверок R_k	Диагноз	Примечание
1	10 (1, 0)	$1_1 0_2 0_3 0_4 1_5 1_6$ $0_7 1_8 1_9 0_{10} 0_{11} 1_{12}$	$10 \vee 1 \cdot 8$	неоднозн. без общ. части
2	1·8 (0, 2)	$1_1 0_2 0_3 0_4 1_5 1_6$ $0_7 1_8 1_9 0_{10} 0_{11} 0_{12}$	$10 \vee 1 \cdot 8$	неоднозн. без общ. части
3	10, 12 (2, 0)	$1_1 1_2 0_3 1_4 1_5 1_6$ $0_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$(10 \vee 1 \cdot 8) \cdot$ $(12 \vee 2 \cdot 3)$	неоднозн. без общ. части
4	13, 6, 7 (1, 2)	$0_1 1_2 1_3 1_4 0_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$(13 \vee 4 \cdot 5) \cdot$ $(6 \cdot 7 \vee 11)$	неоднозн. без общ. части
5	10, ·12, 4, ·6 (2, 2)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	Ψ_x	неоднозн. без общ. части
6	9 (комму- татор)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	Ψ_x	неоднозн. без общ. части
7	1, 2, 3, 4 (0, 4)	$1_1 1_2 0_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 0_8 1_9 1_{10} 1_{11} 0_{12}$	$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot$ $\bar{5} \cdot \bar{6} \cdot \bar{7} \cdot \bar{8} \cdot \bar{9} \cdot$ $\bar{10} \cdot \bar{11} \cdot \bar{12} \cdot \bar{13}$	однозн. полный
8	2, 4, 5, 7 (0, 4)	$1_1 1_2 1_3 1_4 0_5 0_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 0_{11} 1_{12}$	$2 \cdot 7 \cdot (4 \cdot 5 \vee 13)$	неоднозн. общ./часть
9	2, 4, 6, 8 (0, 4)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$9 \vee 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7$ $\vee 2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8$	неоднозн. без общ. части

1. Результаты раскодирования синдрома R_k существенно зависят от числа нулей в его составе. Как отмечалось, раскодирование 12-разрядного единичного синдрома дает большое число вариантов комбинации компонентов, подозреваемых в неисправности. Как видно из (1) и (2), характерной чертой вариантов диагноза после раскодирования

такого синдрома является отсутствие однозначной общей части – одного или нескольких компонентов, входящих во все варианты диагноза.

Примеры отказовых ситуаций, приводящих к неоднозначному диагнозу без общей части, показаны в строках 1, 2, 3, 4, 5, 9 таблицы 4. Важной особенностью отказовых ситуаций, приведенных в строках 1, 3, 4, 5, является наличие в их составе неисправных абонентов 10, 12, 13.

Дело в том, что неисправность абонента 10 (ситуация 1) даст единичную оценку на проверках 1, 5, 6, 8, 9, 12, а после раскодирования – диагноз ($10 \vee 1 \cdot 8$), показанный в строке 1. Одновременная неисправность двух линий связи 1 и 8, соединяющих абонент 10 с коммутатором 9, приведет к тому же синдрому (в строке 2) и тому же диагнозу, что и для неисправного абонента 10 (в строке 1).

По той же причине – последовательное соединение абонента 13 и примыкающих линий связи 4, 5 – в диагнозе для ситуаций 4, 8 появляется двучлен ($13 \vee 4 \cdot 5$), означающий неоднозначность диагноза без общей части.

2. Для получения более определенного диагноза синдром R_k должен содержать несколько нулевых оценок. Из таблицы проверок унифицированного фрагмента (таблица 1) нетрудно заключить, что нулевая оценка любой проверки подтверждает исправность пяти компонентов: двух абонентов, коммутатора и двух линий связи. Знание исправных компонентов при раскодировании позволяет уменьшить состав некоторых функций F_j , вычеркнув переменные тех компонентов, которые признаны исправными проверкой с нулевой оценкой.

В строках 7, 8 таблицы 4 приведены примеры отказовых ситуаций, для которых формируется более определенный диагноз: однозначный, полный (строка 7) и неоднозначный с общей частью (строка 8). Такие виды диагноза удовлетворяют требованиям постановки задачи и могут быть использованы для восстановления исправности диагностируемого фрагмента.

Для повышения разрешающей способности диагноза в отказовых ситуациях, включающих один или несколько неисправных абонентов, выполним процедуры контроля и

диагностирования других фрагментов ЦС. Так как каждая линия связи и соответствующий коммутатор тестируются в составе только одного фрагмента, а каждый абонент тестируется в составе четырех фрагментов, то продолжение процедур контроля и диагностирования ЦС позволит получить информацию, уточняющую техническое состояние компонентов ЦС.

5. Фрагментный подход к диагностированию неисправных компонентов ЦС со структурой минимального квазиполного графа (на примере графа размера 7×7) – вариант 2

Первый вариант фрагментного подхода к диагностированию неисправных компонентов анализируемой ЦС использует унифицированные процедуры для поочередного диагностирования фрагментов, включающих разные коммутаторы и связанные с ними абоненты. Анализ результатов диагностирования компонентов унифицированного фрагмента, показанных в таблице 4, выявил недостаток такого подхода: увеличение количества отказовых ситуаций с неоднозначным диагнозом без общей части. Одной из причин таких диагнозов является наличие неисправного абонента в составе фрагмента.

Перспективным подходом к устранению этого недостатка является разделение во времени процедур диагностирования абонентов и примыкающих к ним линий связи. Для реализации такого подхода разделим процесс диагностирования ЦС на два этапа: проверка абонентов и проверка коммутаторов и линий связи в составе уменьшившихся фрагментов.

На первом этапе ДМ посылает очередному абоненту A_j , $j = 1, \dots, 7$, запрос о его состоянии. Если абонент A_j исправен, то он отправляет ответ ДМ, который фиксирует оценку $r_j = 0$. Если в течение интервала Δt ответ не придет, то ДМ фиксирует оценку $r_j = 1$. Поскольку каждый абонент проверяется поодиночке, то фиксируемая оценка ($r_j = 0$ или 1) однозначно определяет техническое состояние проверенного абонента: исправен или нет. После проверки всех абонентов ДМ передает

полученные оценки обслуживающему персоналу для замены на исправные тех абонентов, для которых получены оценки $r_j = 1$.

Второй этап состоит из n подэтапов (в последующем тексте $n = 7, m = 4$). На каждом подэтапе ДМ с помощью m исправных абонентов проверяет очередной фрагмент системы, включающий коммутатор и присоединенные к нему m входных и m выходных линий связи (для последующих ссылок назовем его фрагментом 2).

Во втором варианте фрагментного подхода используются те же диагностические процедуры (проверки, раскодирование синдрома с целью формирования диагноза), что и первом варианте. Поэтому при изложении второго варианта основное внимание будет уделено описанию различий в получаемых результатах.

Для диагностирования технического состояния унифицированного фрагмента 2 ДМ использует 12 проверок, показанных в таблице 5, которая построена на основе таблицы проверок универсального фрагмента (таблица 1). Исправные абоненты A_j и $A_k, j \neq k = 10, 11, 12, 13$, вынесены в отдельные столбцы. Поэтому в столбце «Проверяемые подсистемы $U_{j,i,k}$ » таблицы 5 записаны номера коммутатора 9 и линий связи, входящих в состав подсистем $U_{j,i,k}$, проверяемых абонентом A_j . Отметим, что в клетках строк 1, ..., 12 таблицы 5 (как в таблице 1) номера индексов линий связи показаны без символа l .

После выполнения всех 12 проверок в столбце «Оценка $r_{j,i,k}$ » таблицы 5 будет записан синдром проверок R_x , раскодирование которого даст диагноз – номера неисправных и исправных компонентов анализируемого фрагмента системы.

В таблице 6 приведены результаты диагностирования некоторых характерных отказовых ситуаций, которые получены с использованием алгебрологического метода раскодирования. При построении таблицы 6 записи в столбцах имеют тот же смысл, что и в одноименных столбцах таблицы 4. Исключением является столбец «Отказовая ситуация», в котором показаны номера неисправных линий связи N_k , а в скобках – количества неисправных входных и выходных линий связи.

Таблица 5. Таблица проверок для унифицированного фрагмента 2

№№ п/п	Проверка $p_{j,i,k}$	Абонент A_j	Проверяемые подсистемы $U_{j,i,k}$	Абонент A_k	Оценка $r_{j,i,k}$
1	$p_{10,9,12}$	10	1, 9, 2	12	r_1
2	$p_{12,9,13}$	12	3, 9, 4	13	r_2
3	$p_{13,9,11}$	13	5, 9, 6	11	r_3
4	$p_{11,9,12}$	11	7, 9, 2	12	r_4
5	$p_{12,9,10}$	12	3, 9, 8	10	r_5
6	$p_{10,9,11}$	10	1, 9, 6	11	r_6
7	$p_{11,9,13}$	11	7, 9, 4	13	r_7
8	$p_{13,9,10}$	13	5, 9, 8	10	r_8
9	$p_{10,9,13}$	10	1, 9, 4	13	r_9
10	$p_{13,9,12}$	13	5, 9, 2	12	r_{10}
11	$p_{12,9,11}$	12	3, 9, 6	11	r_{11}
12	$p_{11,9,10}$	11	7, 9, 8	10	r_{12}

Анализ записей таблицы 6 позволяет сделать следующие выводы.

1. В постановке задачи написано, что разрабатываемый способ диагностирования должен однозначно идентифицировать хотя бы один неисправный компонент.

Для ситуаций N_1, N_2 , приводящих к единичному синдрому, после раскодирования получим диагноз

$$(3) \Psi_x^* = 9 \vee 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \vee 2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8 \vee 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 8 \vee \\ \vee 1 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 8 \vee 1 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8 \cdot \vee 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot$$

Нетрудно заметить, что этот диагноз можно получить из функции Ψ_x из (1) после вычеркивания членов, включающих переменные абонентов (ведь абоненты исправны).

Таблица 6. Таблица результатов диагностирования 2

N_k	Отказовая ситуация	Синдром проверок R_k	Диагноз	Примечание
1	1, 3, 5, 7 (4, 0)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	Ψ_x^*	неоднозн. без общ. части
2	1, 2, 9 (1, 1, комму- татор)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	Ψ_x^*	неоднозн. без общ. части
3	1, 3, 7 (3, 0)	$1_1 1_2 0_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 0_8 1_9 0_{10} 1_{11} 1_{12}$	$1 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 4 \cdot$ $\bar{2} \cdot \bar{5} \cdot \bar{6} \cdot \bar{8} \cdot \bar{9}$	однозн. не полный
4	1, 2, 3, 7 (3, 1)	$1_1 1_2 0_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 0_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 7 \cdot$ $4 \cdot \bar{5} \cdot \bar{6} \cdot \bar{8} \cdot \bar{9}$	однозн. не полный
5	1, 2, 3, 4 (2, 2)	$1_1 1_2 0_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 0_8 1_9 1_{10} 1_{11} 0_{12}$	$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot$ $\bar{5} \cdot \bar{6} \cdot \bar{7} \cdot \bar{8} \cdot \bar{9}$	однозн. полный
6	1, 2, 3, 6, 7 (3, 2)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 0_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$2 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 7 \cdot \bar{9}$ $(1 \vee 4) \cdot \bar{5} \cdot \bar{8}$	неоднозн. общ./часть

Диагноз Ψ_x^* из (3) содержит 7 дизъюнктивных членов, которые определяют возможные варианты неоднозначного диагноза без общей части:

- неисправен коммутатор 9
- или четыре входные линии связи: $1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7$,
- или четыре выходных линии связи: $2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8$,
- или три входных и три выходных линии связи (4 варианта).

Такой диагноз не удовлетворяет требованиям постановки задачи. Он показывает границы количества неисправных компонентов разных типов, при достижении которых данный способ диагностирования не «работает». Индикатором,

предупреждающим о получении такого диагноза, является единичный синдром проверок R , показанный в строках 1, 2.

2. В таблице 6 показаны примеры нескольких отказовых ситуаций, синдромы проверок R которых содержат один или несколько нулей, что приводит к диагнозам, удовлетворяющим требованиям постановки задачи:

- для ситуации 5 – диагноз однозначный и полный;
- для ситуации 3, 4 – диагноз однозначный, но неполный: осталось не идентифицированным техническое состояние компонента 4, над номером которого поставлен знак «тильда»;
- для ситуации 6 – диагноз неоднозначный, но с общей частью: подозреваются в неисправности компоненты 2, 3, 6, 7, а компонент 1 показан в скобках (в числе неоднозначно диагностируемых).

Суммируя вышесказанное, можно заключить, что второй вариант фрагментного подхода гарантирует однозначное диагностирование:

- от одного до семи неисправных абонентов
- или не больше четырех неисправных линий при исправном коммутаторе и четырех исправных абонентах каждого фрагмента.

3. Таблицы проверок (таблица 5) и результатов диагностирования (таблица 6) построены в номерах компонентов унифицированного фрагмента. Чтобы использовать их для диагностирования компонентов очередного фрагмента анализируемой ЦС, нужно воспользоваться соответствующей таблицей сопоставления – таблицей 2_1 или таблицей 2_2 . Как и ранее в варианте 1, с помощью одной из этих таблиц преобразуем таблицу проверок унифицированного фрагмента 2 (таблица 5) в таблицу проверок анализируемого фрагмента. Диагноз, полученный после раскодирования 12-разрядного синдрома проверок анализируемого фрагмента с помощью универсальной программы, будет записан в номерах компонентов унифицированного фрагмента 2. Для получения диагноза в номерах компонентов анализируемого фрагмента эти номера нужно преобразовать в номера данного фрагмента с помощью той же таблицы сопоставления. Подобные действия

нужно выполнить для каждого фрагмента анализируемой системы.

В [4] представлена модификация варианта фрагментного диагностирования, разработанная для фрагмента 3, содержащего коммутатор и 4 линии связи, соединяющие данный коммутатор с четырьмя абонентами. Уменьшение числа линий связи с восьми до четырех позволило уменьшить число проверок в таблице, аналогичной таблице 5, с двенадцати до шести при обеспечении диагноза, удовлетворяющего требованиям постановки задачи.

6. Особенности восстановления ЦС со структурой минимального квазиполного графа (на примере графа размера 7×7)

В соответствии с записями в столбце «Примечание» таблиц 4 и 6 приведенные результаты диагностирования отказовых ситуаций можно объединить в две группы:

1) диагноз однозначный или неоднозначный, но с общей частью;

2) диагноз неоднозначный, без общей части.

Получив диагноз, относящийся к первой группе, обслуживающий персонал должен заменить исправными компоненты общей части, подозреваемые в неисправности, и повторить процедуры диагностирования для подтверждения исправности восстановленного фрагмента или идентификации оставшихся неисправных компонентов.

Неоднозначный диагноз без общей части получается, прежде всего для отказовых ситуаций, синдром проверок которых содержит только единицы. В таблицах 4 и 6 показаны примеры отказовых ситуаций, синдромы которых содержат один или несколько нулей, но после их раскодирования также получается неоднозначный диагноз без общей части.

Для восстановления отказовых ситуаций с диагнозом из второй группы нужно сократить количество неисправных компонентов в составе анализируемой отказовой ситуации, заменив некоторые компоненты, подозреваемые в неисправности, на исправные. При этом право выбора «первого

хода» – первоначальных замен до получения приемлемого синдрома – остается за обслуживающим персоналом, который может использовать дополнительные критерии.

Одним из таких критериев может быть выбор из формулы диагноза членов наименьшей длины, поскольку вероятность отказа меньшего числа компонентов больше, чем вероятность отказа большего числа компонентов. Такое вероятностное обоснование справедливо для компонентов одного типа и может быть ошибочным для компонентов разных типов. В качестве примеров можно назвать ситуации 5 и 6 в таблице 4, синдромы проверок которых – единичные коды. Диагноз таких синдромов – функция Ψ_x из (1) – имеет член наименьшей длины: коммутатор 9, которого нет в составе ситуации 5. Другой пример возможной ошибки – ситуация 2 в таблице 4 (одновременная неисправность линий связи 1 и 8), синдром проверок которой неразличим от синдрома проверок для ситуации 1 (абонент 10). Как видно из табл. 4, диагноз для этих ситуаций – одинаков ($10 \vee 1 \cdot 8$), и выбор для замены члена меньшей длины (компонента 10) означает ошибку, если во фрагменте имеет место отказовая ситуация 2.

Еще более неопределенным представляется выбор заменяемых компонентов в ситуации, для которой варианты диагноза имеют равное число компонентов одного типа, подозреваемых в неисправности. В этом случае в качестве критерия выбора очередного заменяемого компонента можно использовать число вхождений каждого компонента в состав подсистем, контролируемых на двенадцати проверках из таблицы 1 (или таблицы 5 для второго варианта). Подсчет показывает, что коммутатор имеет 12 вхождений, каждый из четырех абонентов – по 6 вхождений, каждая из восьми линий связи – по 3 вхождения. В соответствии с этими числами в первом варианте фрагментного подхода предлагается в каждом фрагменте заменять сначала коммутатор, затем поочередно – по одному случайно выбранному абоненту, затем поочередно – по одной случайно выбранной линии связи. После каждой замены повторяются проверки из таблицы 1. Замены проводятся до

получения приемлемого диагноза: однозначно идентифицирующего хотя бы один неисправный компонент.

Второй вариант имеет 2 этапа диагностирования: сначала поочередно проверяются и заменяются неисправные абоненты. На втором этапе предлагается в каждом фрагменте заменить сначала коммутатор, затем поочередно – по одной линии связи.

И в первом, и во втором вариантах можно заменять не один, а несколько компонентов. Это позволит сократить время восстановления фрагмента за счет возможного использования большего числа исправных резервных компонентов.

Например, пусть неисправны 4 входные линии связи (ситуация N_1 в таблице 6). Тогда проверки из таблицы 5 дадут единичный синдром и неоднозначный диагноз без общей части. Заменяем входную линию связи 5, тогда исходная ситуация N_1 перейдет в ситуацию N_3 с однозначным, но неполным диагнозом, определяющим однозначное продолжение действий по восстановлению фрагмента. Неизбежное увеличение времени диагностирования за счет нескольких прогонов проверок из таблиц 1 или 5 представляется не слишком большой задержкой по сравнению со временем замены неисправных компонентов.

7. Заключение

Для увеличения количества однозначно диагностируемых компонентов цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа предложен фрагментный подход к диагностированию компонентов анализируемых ЦС. Разработано 2 варианта реализации фрагментного подхода, различающиеся составом диагностируемых фрагментов. В первом варианте ЦС разделяется на n фрагментов одинакового состава: коммутатор, t абонентов, t входных и $2t$ выходных линий связи коммутатора с абонентами. Во втором варианте n абонентов выделяются в отдельный блок, а фрагменты получают меньшего состава: коммутатор, t входных и $2t$ выходных линий связи коммутатора с исправными абонентами.

Организацию процессов диагностирования в различных подсистемах ЦС и обработку полученных результатов

выполняет исправный диагностический монитор (ДМ), имеющий доступ к каждому абоненту.

Применительно к каждому фрагменту и блоку абонентов ДМ реализует последовательный способ диагностирования, включающий тестирование компонентов фрагмента (блока) и замену идентифицированных неисправных компонентов на исправные (с участием обслуживающего персонала).

В первом варианте фрагментного подхода наличие неисправных абонентов в составе проверяемых фрагментов ограничивает возможные однозначные диагнозы одиночными неисправными компонентами каждого фрагмента.

Второй вариант фрагментного подхода гарантирует достоверное диагностирование

– от одного до семи неисправных абонентов

– или не больше четырех неисправных линий при исправном коммутаторе и четырех исправных абонентах каждого фрагмента.

Сравнение этих цифр с величинами диагностируемости ЦС [2, 3], приведенными во введении, позволяет заключить, что эти цифры существенно больше величин из [2, 3]. Такое различие обусловлено использованием фрагментного подхода, диагностирующего отдельные фрагменты, включающие только часть компонентов всей ЦС, и возможностями восстановления (ремонта) идентифицированных неисправных компонентов.

Эти преимущества второго варианта фрагментного подхода прогнозируют возможности его практического применения, прежде всего, для диагностирования ЦС на стадии первичной отладки или после больших перерывов в использовании по назначению. Что же касается первого варианта фрагментного подхода, то его целесообразно использовать для диагностирования одиночных неисправных компонентов в процессе использования ЦС по назначению.

Представленные варианты фрагментного подхода к диагностированию компонентов анализируемых ЦС состоят из последовательности проверок и восстановления компонентов очередного фрагмента. Основным параметром, определяющим количество необходимых проверок для каждого фрагмента, является значение m – количество портов одного абонента.

Длина диагностического теста для отдельного фрагмента определяется формулой $[L = m(m - 1)]$, в рассмотренном примере $L = 12$ (в таблицах 1 и 5). С увеличением значения m длина теста L достаточно быстро растет. Можно уменьшить число проверок в диагностическом тесте, но при этом уменьшатся количество и кратность однозначно диагностируемых неисправных компонентов. Если окажется, что длина выбранного теста $L < L^* = 2m$, то такой тест не будет различать даже некоторые неисправные одиночные компоненты.

Количество и продолжительность выполняемых процедур пропорциональна числу модулей n в одной доле. Что же касается параметра σ – количества путей между двумя абонентами, проходящих через σ коммутаторов, – то этот параметр не влияет на процедуры проверок одного фрагмента, так как указанные пути проходят через разные коммутаторы.

Представленный фрагментный подход к диагностированию компонентов цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа является достаточно общим и может быть распространен на ЦС аналогичной структуры с другими параметрами.

В качестве примера подобного распространения в [5] представлен вариант фрагментного диагностирования неисправных компонентов цифровой системы со структурой минимального квазиполного графа с параметрами $n = 13$, $m = 4$, $\sigma = 1$.

Литература

1. АВИЖЕНИС А. *Отказоустойчивость – свойство, обеспечивающее постоянную работоспособность цифровых систем* // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66, №10. – С. 5–25.
2. ВЕДЕШЕНКОВ В.А., КУРАКО Е.А., ЛЕБЕДЕВ В.Н. *О диагностировании цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7* // Проблемы управления. – 2014. – №6. – С. 68–76.

3. ВЕДЕШЕНКОВ В.А., КУРАКО Е.А., ЛЕБЕДЕВ В.Н. *О диагностируемости компонентов цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7 с 2 путями между 2 абонентами* // Управление большими системами. – Вып. 58. – М: ИПУ РАН, 2015. – С. 90–114.
4. ВЕДЕШЕНКОВ В.А.; *Подход к фрагментному диагностированию компонентов цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа (на примере графа размера 7×7)* // Проблемы управления. – 2016. – №6. – С. 53–58.
5. ВЕДЕШЕНКОВ В.А. *О диагностировании неисправных компонентов цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа (на примере графа размера 13×13)* // Труды XXIV Международной научной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем», Москва, 21 декабря 2016 г. – Издательский центр РГТУ, 2016. – С. 188–192.
6. КАРАВАЙ М.Ф., ПОДЛАЗОВ В.С. *Распределенный полный коммутатор как «идеальная» системная сеть для многопроцессорных вычислительных систем* // Управление большими системами. – Вып. 34. – М.: ИПУ РАН. 2011. – С. 92–116.
7. КАРАВАЙ М.Ф., ПАРХОМЕНКО П.П., ПОДЛАЗОВ В.С. *Комбинаторные методы построения двудольных однородных минимальных квазиполных графов (симметричных блок-схем)* // Автоматика и телемеханика. – 2009. – №2. – С. 153–170.
8. КАРАВАЙ М.Ф., ПАРХОМЕНКО П.П., ПОДЛАЗОВ В.С. *Простые методы построения квазиполносвязных графов (симметричных блок-схем)* // Сб. тр. IV Междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО'2008)». – М.: ИПУ РАН, 2008. – CD-ROM. – С. 232–249.
9. ALVERSON B., FROESE E., KAPLAN L., ROWETH D. *Cray XCTM Series Network, WP-Aries01-1112*. – Cray Inc, 2012. – 28 p. – URL: <http://www.cray.com/sites/default/files/resources/CrayXCNetwork.pdf> (дата обращения: 16.03.2017).

10. ALVERSON R., ROWETH D., KAPLAN L. *CRAY INC. The Gemini System Interconnect* // 18th IEEE Symposium on High Performance Interconnects. – 2009. – P. 83–87.

**A FRAGMENTATION APPROACH TO DIAGNOSIS
OF DIGITAL SYSTEMS COMPONENTS WITH MINIMAL
QUASICOMPLETE GRAPH STRUCTURES (AN EXAMPLE
OF 7×7 GRAPH)**

Victor Vedeshenkov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, Senior research associate (vva@ipu.ru).

Abstract: The problem of fault diagnosis in a multi-processor computing system is considered. The model of a multi-processor system is called a digital system (DS). A system consists of switches, end-nodes and communication links. The communication graph is bipartite where one part is the switches and the other part is the end-nodes. We propose two methods of a digital system diagnosis based on the fragmentation approach. The first method divides the system into 7 unified fragments, each of which contains a switch, 4 end-nodes and 8 communication links. In the second method, each of the 7 end-nodes is tested separately and every fragment includes a switch and 8 communication links. A reliable diagnosis monitor (DM) sequentially tests the components of a fragment, decodes the received syndrome and then sends the diagnosis to the maintenance staff for a recovery of the broken components. The proposed methods can be applied for diagnosis of another system with similar structure and different parameters.

Keywords: digital systems, communication graph, switch, distributed multi-processor system, fragmentation, decoding.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии В.В. Мазаловым.*

Поступила в редакцию 16.02.2016.

Опубликовано 31.03.2017.