

УДК 004.942 + 004.272.43

ББК 32.973.202

## **ФРАГМЕНТНЫЙ ПОДХОД К ДИАГНОСТИРОВАНИЮ КОМПОНЕНТОВ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ СО СТРУКТУРОЙ МИНИМАЛЬНОГО КВАЗИПОЛНОГО ГРАФА РАЗМЕРА 7×7 С 2 ПУТЯМИ МЕЖДУ 2 АБОНЕНТАМИ**

**Ведешенков В.А.<sup>1</sup>,**

*(Учреждение Российской академии наук  
Институт проблем управления РАН, Москва)*

*Разработано 2 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, декодирует полученный синдром проверок, передает диагноз обслуживающему персоналу для ремонта неисправных компонентов. Повидимому, представленный фрагментный подход можно использовать для диагностирования компонентов ЦС аналогичной структуры с другими параметрами.*

---

<sup>1</sup>Виктор Алексеевич Ведешенков, доктор технических наук, старший научный сотрудник

[yva@ipu.ru](mailto:yva@ipu.ru), Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, тел. (495) 334-75-90).

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

## 1. Введение

Цифровыми системами (ЦС) называются модели многомашинных или многопроцессорных 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  $m \times m$ , а другую –  $m$ - портовые абоненты. Значение  $m$  выбирается минимальным, при котором любые два узла в одной доле связаны  $\sigma$  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  $m$  связаны соотношением  $n = m(m - 1) / \sigma + 1$  и не могут быть взяты произвольно [5, 6, 7]. Пример такого графа размера  $7 \times 7$  с 2 путями между 2 абонентами приведен на рис. 1 для  $n = 7$ ,  $m = 4$ ,  $\sigma = 2$ .

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 [8, 9].

Задачи диагностирования ЦС со структурой минимального квазиполного графа размера  $7 \times 7$  с 2 путями между 2 абонентами рассматривались в [2, 3]. Проведенные исследования показали,

что результаты диагностирования компонентов анализируемых ЦС зависят от ряда факторов:

- структурных особенностей анализируемой ЦС, в частности, от параметра  $m$  – числа портов абонентов,
- полноты диагностического теста относительно числа и видов обнаруживаемых неисправных компонентов,
- выбранного метода диагностирования,
- выбранного метода раскодирования результатов выполненных проверок.

На основании проведенных экспериментов установлено, что выбранные (и показанные в тексте статей [2, 3]) таблица проверок, методы диагностирования и раскодирования гарантируют в рассматриваемой ЦС достоверное правильное однократное (без ремонта) диагностирование не больше:

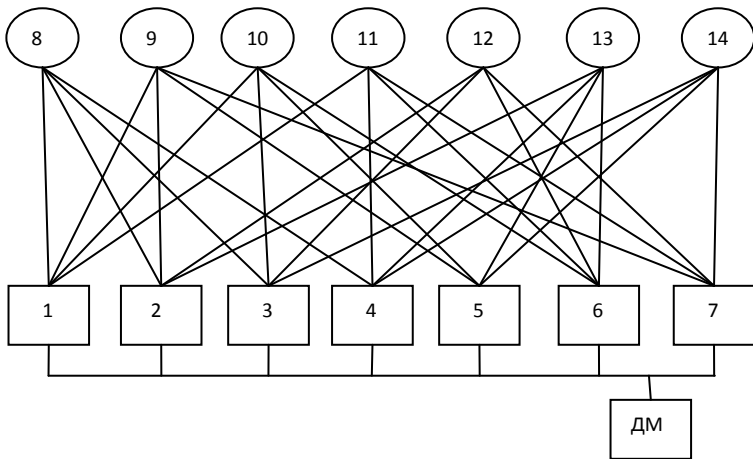
- 2-х неисправных абонентов и 2-х неисправных коммутаторов при исправном состоянии всех линий связи, или
- 1-го неисправного абонента и 3-х неисправных коммутаторов при исправном состоянии всех линий связи, или
- 2-х неисправных линий связи при исправном состоянии всех абонентов и коммутаторов.

Приведенные величины оценок достоверного диагностирования определены для «вредных» неисправностей, как правило, смежных по взаимному расположению компонентов. Это не означает, что не могут быть получены правильные диагнозы при более разбросанном размещении неисправных компонентов по структуре ЦС.

Среди основных причин, влияющих на значения установленных оценок достоверных результатов, следует выделить такие:

- диагностический тест построен для идентификации неисправных компонентов всей ЦС;
- уменьшение числа выполняемых проверок того или иного компонента (по сравнению с числом потенциально возможных),

если проверяющий абонент, предназначенный для контроля состояния проверяемой подсистемы, в которую входит данный компонент, является неисправным или подозревается в неисправности.



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

В статье разработан другой подход к диагностированию неисправных компонентов ЦС рассматриваемой структуры, позволяющий увеличить количество достоверно диагностируемых неисправных компонентов.

## **2. Постановка задачи**

Исходная МВС со структурой минимального квазиполного графа размера  $7 \times 7$  с 2 путями между 2 абонентами представлена диагностическим графом, у которого  $n$  вершин одной доли представляют абоненты (процессоры) системы,  $n$  вершин другой доли - коммутаторы, причем каждый абонент связан с каждым другим абонентом двумя линиями связи, проходящими через 2 разных коммутатора.

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

Организацией процессов диагностирования в различных подсистемах ЦС и обработкой полученных результатов занимается исправный диагностический монитор (ДМ), который находится в модуле, внешнем по отношению к диагностируемой ЦС.

Требуется разработать подход к диагностированию (с ремонтом) неисправных компонентов анализируемой ЦС, достоверно идентифицирующий хотя бы один неисправный из большого числа компонентов.

## **3. Фрагментный подход к диагностированию неисправных компонентов ЦС со структурой минимального квазиполного графа размера $7 \times 7$ с 2 путями между 2 абонентами (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  $\Delta t$ . Отсутствие ответа в течение интервала  $\Delta t$  является признаком проявления (обнаружения) неисправности компонента.

Одним из перспективных способов увеличения числа достоверно диагностируемых неисправных компонентов является фрагментный подход к диагностированию с заменой идентифицированных неисправных компонентов на исправные, активно использующий возможности исправного Диагностического монитора (ДМ), имеющего доступ к каждому абоненту.

Для реализации такого подхода разделим диагностируемую ЦС на фрагменты одинаковой структуры и состава. В качестве такого фрагмента данной ЦС выберем ее подсистему, включающую 1 коммутатор, 4 абонента, связанных с данным коммутатором, и 8 линий связи между данным коммутатором и четырьмя абонентами. Поскольку в ЦС 7 коммутаторов, то ЦС разделяется на 7 фрагментов, связанных через общие абоненты. Таким образом, процесс диагностирования всей ЦС разделяется на 7 этапов диагностирования одного (очередного) фрагмента. Одинаковая структура и состав фрагментов позволяют использовать метод и средства диагностирования, разработанные для одного фрагмента, для диагностирования других фрагментов после соответствующей перенумерации компонентов каждого фрагмента.

Рассмотрим подробнее процесс диагностирования на примере фрагмента ЦС (рис. 1), включающего коммутатор 8, абоненты 1, 2, 3, 4 и соединяющие их линии связи. ДМ диагностирует техническое состояние этого фрагмента с использованием 12 проверок, показанных в табл. 1. Каждая

проверка  $p_{j,i,k}$  контролирует исправность начального абонента  $A_j$ , коммутатора  $c_i$ , конечного абонента  $A_k$  и двух соединяющих их линий связи:  $l_{j-i}$  и  $l_{i-k}$ . Например, для проверки  $p_{1,8,3}$  в клетке табл. 1 на пересечении 1-й строки и столбца «Проверяемые подсистемы  $U_{j,i,k}$ » записаны номера абонента 1, коммутатора 8, абонента 3 и линий связи (1-8) и (8-3), входящих в состав подсистемы  $U_{1,8,3}$ . Отметим, что в клетках табл. 1 номера индексов линий связи показаны без символа  $l$ .

Двенадцать проверок, показанных в табл. 1, образуют полный тест для контроля исправности 12 путей, которые возможны между любой парой из четырех абонентов, связанных с коммутатором 8 с помощью восьми прилегающих линий связи. Полнота проверяющего теста является необходимой для повышения точности диагностирования линий связи этого фрагмента.

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  $\Delta\tau$  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 в клетку оценки 0 или 1 ДМ передает следующему абоненту сообщение о необходимости выполнения очередной проверки.

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

Таблица 1. 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	
2	$p_{3,8,4}$	3, (3-8), 8, (8-4), 4	
3	$p_{4,8,2}$	4, (4-8), 8, (8-2), 2	
4	$p_{2,8,3}$	2, (2-8), 8, (8-3), 3	
5	$p_{3,8,1}$	3, (3-8), 8, (8-1), 1	
6	$p_{1,8,2}$	1, (1-8), 8, (8-2), 2	
7	$p_{2,8,4}$	2, (2-8), 8, (8-4), 4	
8	$p_{4,8,1}$	4, (4-8), 8, (8-1), 1	
9	$p_{1,8,4}$	1, (1-8), 8, (8-4), 4	
10	$p_{4,8,3}$	4, (4-8), 8, (8-3), 3	
11	$p_{3,8,2}$	3, (3-8), 8, (8-2), 2	
12	$p_{2,8,1}$	2, (2-8), 8, (8-1), 1	

Для диагностирования остальных 6 фрагментов ЦС нужно построить таблицы, аналогичные табл. 1. Для упрощения построения этих таблиц построим унифицированную таблицу проверок с помощью таблицы соответствия (табл. 2). В столбцах 1 и 3 табл. 2 показаны номера компонентов унифицированного фрагмента, в столбцах 2 и 4 – номера и индексы переменных из табл. 1 для фрагмента с коммутатором 8.

В табл. 3 показана таблица проверок унифицированного фрагмента, построенная на основе табл. 1 с использованием соответствия номеров из табл. 2.



Таблица 2. Таблица соответствия для коммутатора  $\delta$

№ компонента	Индекс переменной	№ компонента	Индекс переменной
1	1-8	9	ком. 8
2	8-3	10	аб. 1
3	3-8	11	аб. 2
4	8-4	12	аб. 3
5	4-8	13	аб. 4
6	8-2		
7	2-8		
8	8-1		

Таблица 3. 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	
2	$P_{12,9,13}$	12, 3, 9, 4, 13	
3	$P_{13,9,11}$	13, 5, 9, 6, 11	
4	$P_{11,9,12}$	11, 7, 9, 2, 12	
5	$P_{12,9,10}$	12, 3, 9, 8, 10	
6	$P_{10,9,11}$	10, 1, 9, 6, 11	
7	$P_{11,9,13}$	11, 7, 9, 4, 13	
8	$P_{13,9,10}$	13, 5, 9, 8, 10	
9	$P_{10,9,13}$	10, 1, 9, 4, 13	
10	$P_{13,9,12}$	13, 5, 9, 2, 12	
11	$P_{12,9,11}$	12, 3, 9, 6, 11	
12	$P_{11,9,10}$	11, 7, 9, 8, 10	

Для построения таблицы проверок другого фрагмента - например, фрагмента с коммутатором 14 - проведем в табл. 2 замену номеров абонентов 1, 2, 3, 4 на номера абонентов 3, 4, 5, 7, и номера коммутатора 8 на номер коммутатора 14. В табл. 4 показана таблица соответствия для фрагмента с коммутатором 14, полученная после таких замен.

С использованием нумерации из табл. 4 таблица проверок унифицированного фрагмента (табл. 3) преобразуется в таблицу проверок фрагмента с коммутатором 14, показанную в табл. 5.

*Таблица 4. Таблица соответствия для коммутатора 14*

№ компонента	Индекс переменной	№ компонента	Индекс переменной
1	3-14	9	ком. 14
2	14-5	10	аб. 3
3	5-14	11	аб. 4
4	14-7	12	аб. 5
5	7-14	13	аб. 7
6	14-4		
7	4-14		
8	14-3		

#### **4. Способ раскодирования результатов проверок компонентов ЦС со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7 с 2 путями между 2 абонентами**

Для раскодирования результатов проверок и формирования диагноза воспользуемся алгебрологическим методом из [4].

Таблица 5. Таблица проверок для коммутатора 14

№№ п/п	Проверка $p_{j,i,k}$	Проверяемые подсистемы $U_{j,i,k}$	Оценка $r_{j,i,k}$
1	$p_{3,14,5}$	3, (3-14), 14, (14-5), 5	
2	$p_{5,14,7}$	5, (5-14), 14, (14-7), 7	
3	$p_{7,14,4}$	7, (7-14), 14, (14-4), 4	
4	$p_{4,14,5}$	4, (4-14), 14, (14-5), 5	
5	$p_{5,14,3}$	5, (5-14), 14, (14-3), 3	
6	$p_{3,14,4}$	3, (3-14), 14, (14-4), 4	
7	$p_{4,14,7}$	4, (4-14), 14, (14-7), 7	
8	$p_{7,14,3}$	7, (7-14), 14, (14-3), 3	
9	$p_{3,14,7}$	3, (3-14), 14, (14-7), 7	
10	$p_{7,14,5}$	7, (7-14), 14, (14-5), 5	
11	$p_{5,14,4}$	5, (5-14), 14, (14-4), 4	
12	$p_{4,14,3}$	4, (4-14), 14, (14-3), 3	

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  $\bar{r}_j$ ) запишем так:

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

- 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  $p_1, \dots, p_k$  состоит из следующих этапов.

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

2. Построить функцию  $\bar{\Phi}$  как конъюнкцию всех функций  $\bar{F}_j$ .

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

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

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

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

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

Пусть после выполнения 12 проверок табл. 2 для унифицированного фрагмента получен синдром

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

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):

$$F_1 = (10 \vee 1 \vee 9 \vee 2 \vee 12),$$

$$F_2 = (12 \vee 3 \vee 9 \vee 4 \vee 13),$$

$$F_3 = (13 \vee 5 \vee 9 \vee 6 \vee 11),$$

$$F_4 = (11 \vee 7 \vee 9 \vee 2 \vee 12),$$

$$F_5 = (12 \vee 3 \vee 9 \vee 8 \vee 10),$$

$$F_6 = (10 \vee 1 \vee 9 \vee 6 \vee 11),$$

$$F_7 = (11 \vee 7 \vee 9 \vee 4 \vee 13),$$

$$F_8 = (13 \vee 5 \vee 9 \vee 8 \vee 10),$$

$$F_9 = (10 \vee 1 \vee 9 \vee 4 \vee 13),$$

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

$$F_{11} = (12 \vee 3 \vee 9 \vee 6 \vee 11),$$

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

Поскольку номер 9 входит во все функции  $F_j$ , то при конъюнктивном перемножении функций  $F_j$  общий член (этот номер 9) выйдет из скобок. Сделаем это сразу при построении функции  $\Psi_x$ :

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

после перемножения и поглощения членов большей длины членами меньшей длины и сокращения подобных членов получим начальную часть функции  $\Psi_x$  в следующем виде (здесь и в последующем знаки конъюнкции из начального вида функции заменены точкой):

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

Каждый член функции  $\Psi_x$  определяет один из вариантов диагноза: номера компонентов, неисправность которых приводит к единичному синдрому  $R_x$ . Для пояснения логических причин полученных результатов раскодирования вернемся к номерам компонентов из фрагмента с коммутатором 8. Тогда вместо функции  $\Psi_x$  получим диагноз для компонентов фрагмента с коммутатором 8:

$$\begin{aligned}
Dz_{8,x} = & c_8 \vee a_{10} \cdot a_{11} \cdot a_{12} \vee a_{11} \cdot a_{12} \cdot a_{13} \vee a_{10} \cdot a_{12} \cdot a_{13} \vee a_{10} \cdot a_{11} \cdot a_{13} \\
& \vee l_{1-8} \cdot l_{3-8} \cdot l_{4-8} \cdot l_{2-8} \vee l_{8-3} \cdot l_{8-4} \cdot l_{8-2} \cdot l_{8-1} \vee l_{1-8} \cdot l_{3-8} \cdot l_{4-8} \cdot l_{8-3} \cdot l_{8-4} \cdot l_{8-1} \\
(2) \quad & \vee l_{1-8} \cdot l_{3-8} \cdot l_{2-8} \cdot l_{8-3} \cdot l_{8-2} \cdot l_{8-1} \vee l_{1-8} \cdot l_{4-8} \cdot l_{2-8} \cdot l_{8-4} \cdot l_{8-2} \cdot l_{8-1} \\
& \vee l_{3-8} \cdot l_{4-8} \cdot l_{2-8} \cdot l_{8-3} \cdot l_{8-4} \cdot l_{8-2}.
\end{aligned}$$

Диагноз  $Dz_{8,x}$ , полученный после раскодирования 12-ти разрядного единичного синдрома  $R_x$ , содержит 11 подмножеств неисправных компонентов

- неисправен коммутатор 8,
- или три из четырех абонентов (4 подмножества),
- или четыре входные линии связи: (1-8), (2-8), (3-8), (4-8),
- или четыре выходные линии связи: (8-1), (8-2), (8-3), (8-4),
- или три входных и три выходных линии связи (6 подмножеств).

Нетрудно найти другие комбинации неисправных абонентов и линий связи, проверка которых дает 12-ти разрядный единичный синдром. Например, продолжение функции  $\Psi_x$  из (1) будет содержать такие конъюнкции:

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

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

Состав конъюнкций из функций  $\Psi_x$  и  $\Delta\Psi_x$  показывает 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 табл. 6 приведены результаты диагностирования некоторых характерных отказовых ситуаций, полученные с использованием показанного метода раскодирования для проверок из табл. 1.

В левом столбце табл. 6 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 табл. 3, причем 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 табл. 6 позволяет сделать следующие выводы.

1. Результаты раскодирования синдрома  $R_k$  существенно зависят от числа 0 в его составе. Как отмечалось, раскодирование двенадцати разрядного единичного синдрома дает большое число вариантов комбинации компонентов, подозреваемых в неисправности. Примеры отказовых ситуаций, приводящих к такому синдрому, показаны в строках 6 и 8 табл. 6. Характерной чертой вариантов диагноза после раскодирования такого синдрома является отсутствие однозначной общей части – одного или нескольких компонентов, входящих во все варианты диагноза.



Таблица 6. Таблица результатов диагностирования 1

$N_k$	Отказовая 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	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
3	13, 6 (1, 1)	$0_1 1_2 1_3 0_4 0_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 0_{12}$	$6 \cdot (13 \vee 4 \cdot 5)$	неоднозн общ/часть
4	13, 6, 8 (1, 2)	$0_1 1_2 1_3 0_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$6 \cdot 8 \cdot (13 \vee 4 \cdot 5)$	неоднозн общ/часть
5	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
6	13, 6, 9 (1, 1, комм.)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$\Psi_x$	неоднозн без общ. части
7	13, 10, 6 (2, 1)	$1_1 1_2 1_3 0_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$(13 \vee 4 \cdot 5) \cdot$ $(10 \vee 1 \cdot 8) \cdot$ $(6 \vee 3)$	неоднозн без общ. части
8	10, 12, 4, 6 (2, 2)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$\Psi_x$	неоднозн без общ. части
9	9 (0, 0, коммутатор)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$\Psi_x$	неоднозн без общ. части

10	1 (0, 1)	$1_1 0_2 0_3 0_4 0_5$ $1_6 0_7 0_8 1_9 0_{10}$ $0_{11} 0_{12}$	$1 \cdot \bar{2} \cdot \bar{3} \cdot \bar{4} \cdot \bar{5} \cdot$ $\bar{6} \cdot \bar{7} \cdot \bar{8} \cdot \bar{9} \cdot$ $\bar{10} \cdot \bar{11} \cdot \bar{12} \cdot \bar{13}$	однозн полный
11	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
12	2, 4, 6 (0, 3)	$1_1 1_2 1_3 1_4 0_5 1_6$ $1_7 0_8 1_9 1_{10} 1_{11} 0_{12}$	$2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot \bar{8}$ $\bar{1} \cdot \bar{3} \cdot \bar{5} \cdot \bar{7} \cdot \bar{9} \cdot$ $\bar{10} \cdot \bar{11} \cdot \bar{12} \cdot \bar{13}$	однозн полный
13	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
14	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
15	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
16	1, 3, 4, 7, 8 (0, 5)	$1_1 1_2 0_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$(4 \vee 7) \cdot$ $(1 \cdot 8 \vee 10) \cdot$ $(2 \cdot 3 \vee 12)$	неоднозн без общ. части

2. Для получения более определенного диагноза синдром  $R_k$  должен содержать несколько нулевых оценок. Из таблицы проверок унифицированного фрагмента (табл. 3) 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 табл. 6 показаны записи для отказовой ситуации 7, синдром проверки которой имеет одну нулевую оценку. В результате раскодирования для ситуации 7 получен неоднозначный диагноз, 8 вариантов которого не имеют общей части.

Подобный результат: неоднозначный диагноз без общей части, - получен и для отказовой ситуации 1 (2, 5), хотя синдром ее проверок содержит 6 (2, 2) нулей. Причина такого диагноза – наличие абонента (или абонентов) в составе отказовой ситуации. В структуре фрагмента абонент и 2 линии связи, соединяющие его с коммутатором, образуют последовательное соединение без точек разветвления между ними. Неисправность любого из этих компонентов приводит к единичной оценке, раскодирование которой содержит в диагнозе дизъюнкцию переменных этих компонентов. Например, линии связи 1 и 8 соединяют абонент 10 с коммутатором 9. 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. Неисправность двух линий связи 1 и 8 приведет к тому же синдрому (в строке 9), что и для неисправного абонента 10 (в строке 1). По той же причине для ситуаций 3, 4, 5, 7, включающих неисправный абонент 13, в диагнозе появляется двучлен ( $13 \vee 4\cdot 5$ ), так как компоненты 4 и 5 – линии связи между абонентом 13 и коммутатором 9.

3. В табл. 6 показаны 6 отказовых ситуаций 9-16, не содержащих в их составе неисправных абонентов. В результате для ситуаций 10 и 12 получен диагноз – однозначный и полный, а для ситуации 14 диагноз [ $2\cdot 7\cdot(4\cdot 5 \vee 13)$ ] – неоднозначный, но с общей частью. Что же касается других показанных ситуаций, получивших диагноз «неоднозначный, без общей части», то причины таких диагнозов связаны с различным количеством

неисправных входных и выходных линий связи, что показано в табл. 8.

**5. Фрагментный подход к диагностированию неисправных компонентов ЦС со структурой минимального квазиполного графа размера  $7 \times 7$  с 2 путями между 2 абонентами (вариант 2)**

Фрагментный подход к диагностированию неисправных компонентов анализируемой ЦС (вариант 1) позволяет использовать унифицированные процедуры для поочередного диагностирования фрагментов, включающих разные коммутаторы и связанные с ними абоненты. Анализ результатов диагностирования компонентов унифицированного фрагмента, показанных в табл. 6, выявил недостаток такого подхода: уменьшение разрешающей способности диагностирования за счет увеличения количества неоднозначных диагнозов. Одной из причин такого эффекта является наличие в составе фрагмента абонентов. Дело в том, что последовательное соединение абонента и линий связи с коммутатором, без точек разветвления между ними, приводит к появлению в диагнозе дизъюнкции переменных этих компонентов.

Одним из перспективных подходов 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 фрагментов меньшего состава.

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  $\Delta t$  ответ не придет, то ДМ фиксирует оценку  $r_j = 1$ . Поскольку каждый абонент проверяется по одиночке, 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 7 подэтапов. На каждом подэтапе ДМ с помощью исправных абонентов проверяет очередной фрагмент системы, включающий коммутатор и присоединенные к нему 4 входные и 4 выходные линии связи. ДМ диагностирует техническое состояние этого фрагмента с использованием 12 проверок, показанных в таблице 7, построенной на основе таблицы проверок универсального фрагмента (табл. 3). Для того, чтобы отразить уменьшение состава фрагмента, в столбце «Проверяемые подсистемы  $U_{j,i,k}$ » табл. 7 для абонента  $A_j$  ( $j=10, 11, 12, 13$ ) записаны номера коммутатора 9 и линий связи, входящих в состав подсистем  $U_{j,i,k}$ , проверяемых абонентом  $A_j$ . Исправные абоненты  $A_j$  и  $A_k$  вынесены в отдельные столбцы. Отметим, что в клетках строк 1, ..., 12 табл. 7 (как в табл. 3) номера индексов линий связи показаны без символа  $l$ .

Двенадцать проверок, показанных в табл. 7, образуют полный тест для контроля исправности 12 путей, которые возможны между любой парой из четырех абонентов, проверяющих фрагмент, состоящий из коммутатора 9 и 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 диагностическому монитору (ДМ), который заносит в клетку столбца «Оценка  $r_{j,i,k}$ » оценку 0. Если в течение интервала  $\Delta t$  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 в клетку оценки 0 или 1 ДМ передает следующему абоненту  $A_j$  из табл. 7 сообщение о необходимости выполнения очередной проверки.

Таблица 7. Таблица проверок (для коммутатора 9)

№№ 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	
2	$p_{12,9,13}$	12	3, 9, 4	13	
3	$p_{13,9,11}$	13	5, 9, 6	11	
4	$p_{11,9,12}$	11	7, 9, 2	12	
5	$p_{12,9,10}$	12	3, 9, 8	10	
6	$p_{10,9,11}$	10	1, 9, 6	11	
7	$p_{11,9,13}$	11	7, 9, 4	13	
8	$p_{13,9,10}$	13	5, 9, 8	10	
9	$p_{10,9,13}$	10	1, 9, 4	13	
10	$p_{13,9,12}$	13	5, 9, 2	12	
11	$p_{12,9,11}$	12	3, 9, 6	11	
12	$p_{11,9,10}$	11	7, 9, 8	10	

Такие действия выполняются для всех проверок табл. 7. Это возможно, так как после выполнения первого этапа все абоненты исправны (возможно, после замены обнаруженных неисправных абонентов). После выполнения всех 12 проверок в столбце «Оценка  $r_{j,i,k}$ » табл. 7, как и ранее, будет записан 12-разрядный синдром проверок  $R_x$ , раскодирование которого даст диагноз –

номера неисправных и исправных компонентов анализируемой системы.

В табл. 8 приведены результаты диагностирования некоторых характерных отказовых ситуаций, которые получены с использованием того же метода раскодирования. При построении табл. 8 записи в столбцах имеют тот же смысл, что и в одноименных столбцах табл. 6. Исключением является столбец «Отказовая ситуация», в котором показаны номера неисправных линий связи  $N_k$ , а в скобках – количества неисправных входных и выходных линий связи. По существу, записи табл. 8, представляя результаты диагностирования неисправных линий связи, уточняют записи строк 8-13 табл. 6.

Анализ записей табл. 8 позволяет сделать следующие выводы.

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

Диагноз  $\Psi_x^*$  из (3), полученный для ситуаций  $N_{12}, \dots, N_{14}$ , 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).

Таблица 8. Таблица результатов диагностирования 2

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



11	1, 2, 3, 4, 5, 6 (3, 3)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 0_{12}$	$2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot \bar{9}$ $(1 \vee 6) \cdot \bar{7} \cdot \bar{8}$	неоднозн общ/часть
12	1, 3, 5, 7 (4, 0)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$\Psi_x^*$	неоднозн без общ. части
13	2, 4, 6, 8  (0, 4)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$\Psi_x^*$	неоднозн без общ. части
14	1, 2, 9 (1, 1, комму- татор)	$1_1 1_2 1_3 1_4 1_5 1_6$ $1_7 1_8 1_9 1_{10} 1_{11} 1_{12}$	$\Psi_x^*$	неоднозн без общ. части

где

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

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

Такой диагноз не удовлетворяет требованиям постановки задачи. Он показывает границы количества неисправных компонентов разных типов, при достижении которых данный способ диагностирования не «работает». Индикатором получения такого диагноза является двенадцати разрядный синдром проверок  $R$ , показанный в строках 12-14.

2. Как отмечалось, для получения более приемлемого диагноза синдром проверок  $R$  должен содержать один или

больше нулей. В табл. 8 показаны примеры отказовых ситуаций  $N_9$ ,  $N_{10}$ ,  $N_{11}$ , для которых синдромы проверок содержат по одному нулю. Диагнозы, полученные для этих ситуаций, являются неоднозначными, но разными. Диагнозы для ситуаций  $N_9$  и  $N_{11}$  имеют два варианта, которые содержат общую часть: произведение компонентов  $2 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 7$  и  $2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5$ , подозреваемых в неисправности. Сравнение этих номеров с номерами компонентов, входящих в отказовые ситуации  $N_9$  и  $N_{11}$ , показывает, что они представляют правильный, но неполный диагноз. Этот факт можно использовать при восстановлении исправности данного фрагмента. В то же время варианты диагноза для ситуации  $N_{10}$  не имеют общей части, что затрудняет восстановление исправности данного фрагмента.

3. Уменьшение числа неисправных компонентов в составе отказовых ситуаций приводит к увеличению числа проверок с нулевыми оценками, что сопровождается повышением точности диагностирования. Так, в отказовых ситуациях  $N_1, \dots, N_4$  содержится небольшое число неисправных компонентов (2, 3, 4). В результате раскодирования синдромов для этих ситуаций получен однозначный и полный диагноз. Раскодирование синдромов проверки для отказовых ситуаций  $N_5, \dots, N_8$  приводит к однозначному, но неполному диагнозу: остались не идентифицированными технические состояния некоторых компонентов, над номерами этих компонентов в строках 5, ..., 8 табл. 8 поставлены знаки «тильда».

4. Таблицы проверок (табл. 7) и результатов диагностирования (табл. 8) построены в номерах компонентов унифицированного фрагмента. Чтобы использовать их для диагностирования компонентов очередного фрагмента анализируемой ЦС, нужно построить таблицу сопоставления,

аналогичную табл. 2, , подставив в табл. 2 номера коммутатора и четырех абонентов данного фрагмента (так построена табл. 4 для фрагмента с коммутатором 14). С использованием этой таблицы таблица проверок унифицированного фрагмента (табл. 3) преобразуется в таблицу проверок данного фрагмента (аналогично построена табл. 5 с помощью записей табл. 4). Диагноз, полученный после раскодирования этих проверок, записан в номерах унифицированного фрагмента, нужно преобразовать в номера данного фрагмента с помощью той же таблицы сопоставления. Подобные действия нужно выполнить для каждого фрагмента анализируемой системы.

### ***5. Особенности восстановления ЦС со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7 с 2 путями между 2 абонентами***

В соответствии с записями в столбце «Примечание» табл. 6 и 8 результаты диагностирования показанных примеров отказовых ситуаций можно объединить в две группы:

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

2) диагноз неоднозначный, без общей части.

Диагнозы первой группы удовлетворяют требованиям постановки задачи: общая часть диагноза идентифицирует один или больше неисправных компонентов. Получив такой диагноз, 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. Индикатором таких диагнозов с неисправными компонентами является наличие

одной или нескольких единиц в полученном синдроме проверок  $R$ .

Неоднозначный диагноз без общей части получается, прежде всего, для отказовых ситуаций, синдром проверок которых содержит только единицы. В табл. 6 и 8 показаны примеры отказовых ситуаций, синдромы которых содержат один или несколько нулей, но после их раскодирования также получается неоднозначный диагноз без общей части. В любом случае для того, чтобы получить приемлемый диагноз, нужно сократить количество неисправных компонентов в составе анализируемой отказовой ситуации, заменив некоторые компоненты фрагмента на исправные.

Как видно из формул диагнозов, показанных в табл. 6 и 8, они могут содержать члены одинаковой или различной длины. В подобных случаях часто предлагается для замены выбирать члены минимальной длины – с наименьшим числом компонентов, подозреваемых в неисправности, поскольку вероятность отказа меньшего числа компонентов больше, чем вероятность отказа большего числа компонентов. Такое обоснование справедливо для компонентов одного типа и может быть ошибочным для компонентов разных типов. В качестве примеров можно назвать ситуации 6 и 8 в табл. 6, синдромы проверок которых – 12-ти разрядные единичные коды. Диагноз таких синдромов – функция  $\Psi_x$  из (1) – имеет минимальный член: коммутатор 9, которого нет в составе ситуаций 6 и 7. Другой пример возможной ошибки – ситуация 9 в табл. 6 (неисправны линии связи 1 и 8), синдром проверок которой неразличим от синдрома проверок для ситуации 1 (абонент 10). Диагноз для этих ситуаций – одинаков ( $10 \vee 1\cdot 8$ ), и выбор для замены минимального члена (компонента 10) означает ошибку, если во фрагменте имеет место ситуация 9.

Еще более неопределенным представляется выбор заменяемых компонентов в ситуации, для которой варианты диагноза имеют равное число компонентов одного типа, подозреваемых в неисправности. В любом случае, для синдрома с неоднозначным диагнозом без общей части право выбора «первого хода»: первоначальных замен до получения приемлемого синдрома, - остается за обслуживающим персоналом.

В качестве критерия выбора очередного заменяемого компонента можно использовать число вхождений каждого компонента в состав подсистем, контролируемых на двенадцати проверках из табл. 1 (или табл. 7 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 абоненту, затем поочередно – по одной линии связи. После каждой замены выполняются проверки из табл. 1. Замены проводятся до получения приемлемого диагноза, достоверно 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. Как и в первом варианте замены проводятся до получения приемлемого диагноза, достоверно идентифицирующего хотя бы один неисправный компонент.

И в том, и в другом 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 или 4 выходные линии связи (ситуации  $N_{12}$ ,  $N_{13}$  в табл. 8). Тогда проверки из табл. 7 дадут двенадцати разрядный единичный синдром и неоднозначный диагноз без общей части. Заменяем входную линию связи 5 и выходную линию связи 8, тогда исходная ситуация  $N_{12}$  ( $N_{13}$ ) перейдет в ситуацию  $N_5$  ( $N_6$ ) с однозначным, но неполным диагнозом, определяющим однозначное продолжение действий по восстановлению фрагмента. Неизбежное увеличение времени диагностирования за счет нескольких прогонов проверок из табл. 1 или 7 представляется не слишком большой задержкой по сравнению со временем замены неисправных компонентов.

## **6. Заключение.**

Для увеличения числа достоверно диагностируемых компонентов цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа размера  $7 \times 7$  с 2 путями между 2 абонентами предложен фрагментный подход к диагностированию компонентов анализируемых ЦС. Разработано 2 варианта реализации фрагментного подхода, различающиеся составом диагностируемых фрагментов. В первом варианте ЦС разделяется на 7 фрагментов равного состава: коммутатор, 4 входные и 4 выходные линии связи коммутатора с абонентами, 4 соответствующих абонента. Во втором варианте 7 абонентов выделяются в отдельный блок, а фрагменты получаются меньшего состава: коммутатор, 4 входные и 4 выходные линии связи коммутатора с 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 Диагностический монитор (ДМ) реализует последовательный способ диагностирования, включающий проверку компонентов фрагмента (блока) и замену идентифицированных неисправных компонентов на исправные (с участием обслуживающего персонала).

В первом варианте фрагментного подхода ДМ поочередно диагностирует техническое состояние каждого фрагмента, раскодирует полученный синдром проверок, передает диагноз обслуживающему персоналу для замены обнаруженных неисправных компонентов и выполнения других действий, если они необходимы. Наличие неисправных абонентов в составе проверяемых подсистем существенно увеличивает число неоднозначных диагнозов, не имеющих общих частей в различных вариантах диагноза.

Во втором варианте процесс диагностирования ЦС разделен на 2 этапа. На первом этапе ДМ поочередно проверяет техническое состояние абонентов. Поскольку каждый абонент проверяется отдельно, то оценка его проверки ( $r_j = 0$  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  $r_j = 1$ .

На втором этапе ДМ с помощью четырех исправных абонентов поочередно диагностирует техническое состояние каждого фрагмента с использованием 12 проверок из табл. 7. На основе результатов этих проверок ДМ формирует синдром проверок  $R$ , раскодирует его, полученный диагноз передает

обслуживающему персоналу для замены обнаруженных неисправных компонентов.

Результаты диагностирования примеров отказовых ситуаций, показанных в табл. 6 и 8, можно объединить в две группы:

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

2) диагноз неоднозначный, без общей части.

Диагнозы первой группы удовлетворяют требованиям постановки задачи: общая часть диагноза идентифицирует один или больше неисправных компонентов. При таких диагнозах обслуживающий персонал должен заменить исправными компоненты общей части, подозреваемые в неисправности, и повторить диагностику для подтверждения исправности восстановленного фрагмента или идентификации оставшихся неисправных компонентов.

Если предположить, что в составе фрагмента только один неисправный компонент любого типа, то диагноз всегда однозначный и правильный. Справедливость такого утверждения подтверждают примеры в табл. 6: ситуации 9, 10 и 1, если оставить в диагнозе однобуквенный член (компонент 10).

Диагнозы второй группы не позволяют достоверно идентифицировать хотя бы один неисправный компонент, т.е. не удовлетворяют требованиям постановки задачи.

Объективной причиной появления неоднозначных диагнозов без общей части является последовательное соединение компонентов, входящих в состав любой проверки. Такое соединение приводит к тому, что при единичной оценке результатов проверки в число компонентов, подозреваемых в неисправности, входят все компоненты независимо от числа фактически неисправных компонентов. Для получения более точного диагноза (с меньшим числом компонентов, подозреваемых в неисправности) нужны дополнительные проверки, в которых должны участвовать только некоторые из



компонентов, обнаруженные первой (более ранней) проверкой. Примером являются проверки абонентов, проводимые ДМ во втором варианте фрагментного подхода. Для фрагмента, состоящего из коммутатора и 8 линий связи, в табл. 7 показан полный тест для контроля исправности коммутатора и 8 линий связи. Эти компоненты «работают» в пределах своего фрагмента, и никаких проверок средствами других фрагментов организовать нельзя. Так как ДМ не имеет прямого доступа к коммутаторам, то он тоже не может помочь в разделении неисправных коммутатора и линий связи. Поэтому для обеспечения однозначного диагностирования требуется интеллект обслуживающего персонала и исправные запасные компоненты.

Учитывая, что коммутатор имеет большее число вхождений в таблицу проверок, чем абонент и отдельная линия связи, предлагается следующий вариант выхода из тупика для ситуаций с подобным диагнозом:

- заменить на исправный коммутатор, повторить выполнение всех проверок из табл. 1 (при использовании 1-го варианта фрагментного подхода) или табл. 7 (при использовании 2-го варианта фрагментного подхода); при этом возможны два исхода:

- синдром проверок  $R$  изменился: в его коде появились дополнительные нули, раскодирование такого синдрома даст более определенный диагноз,

- синдром проверок  $R$  не изменился, так как коммутатор был исправен или в составе анализируемого фрагмента неисправные компоненты: абоненты и линии связи - образуют отказовую ситуацию, подобную  $N_7$  в табл. 6 или  $N_{12}$ ,  $N_{13}$  в табл. 8. Это означает, что проверка из табл. 1 или 7 недостаточно для получения приемлемого диагноза, нужно продолжить случайные замены: сначала одного - двух абонентов, затем одной - двух линий связи до получения диагноза с меньшим числом вариантов, определяющего пути целесообразных замен.

Из записей табл. 6 видно, что первый вариант фрагментного подхода гарантирует для каждого фрагмента достоверное диагностирование при исправном состоянии коммутатора не больше:

- 2-х или 3-х неисправных линий связи при исправном состоянии 4-х абонентов, или

- 1-го неисправного абонента и 1-ой или 2-х линии связи.

Из записей табл. 8 видно, что второй вариант фрагментного подхода гарантирует достоверное диагностирование

- от 1-го до семи неисправных абонентов, или

- не больше 4-х неисправных линий при исправном коммутаторе и 4-х исправных абонентах каждого фрагмента.

Сравнение этих цифр с величинами диагностируемости анализируемой ЦС [2, 3], приведенными во введении, позволяет заключить, что эти цифры существенно больше величин из [2, 3]. Такое различие прогнозирует возможности его практического применения, прежде всего, для диагностирования ЦС на стадии первичной отладки или после больших перерывов в использовании по назначению.

Представленные варианты фрагментного подхода к диагностированию компонентов анализируемых ЦС состоят из последовательности проверок и восстановления компонентов очередного фрагмента. Диагностические тесты, используемые для проверок компонентов фрагмента, определяются только совокупностью проверяемых компонентов и не зависят от состава и структуры других составляющих ЦС. Основным параметром, влияющим на объем необходимых проверок для каждого фрагмента, является значение  $m$  – количество портов одного абонента. Количество и продолжительность выполняемых процедур пропорциональна общему числу модулей  $n$  в одной доле. Что же касается параметра  $\sigma$  – количество путей между двумя абонентами, проходящих через  $\sigma$  коммутаторов, то этот

параметр не влияет на процедуры проверок одного фрагмента, так как эти пути проходят через разные коммутаторы.

Таким образом, можно заключить, что представленный фрагментный подход к диагностированию компонентов цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа размера  $7 \times 7$  с 2 путями между 2 абонентами является достаточно общим и вероятно, может быть распространен на ЦС аналогичной структуры с другими параметрами.

### **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  $7 \times 7$*  // 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  $7 \times 7$  с 2 путями между 2 абонентами* // Управление большими системами. Выпуск 58. М: ИПУ РАН. 2015.  
URL:<http://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS5804.pdf>.
4. ВЕДЕШЕНКОВ В.А. *Алгебологический метод дешифрации результатов тестирования цифровых систем* // Сборник научных трудов «Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы образования и науки». Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком». 2014. Часть 2. С. 33-36.

5. КАРАВАЙ М.Ф., ПОДЛАЗОВ В.С. *Распределенный полный коммутатор как «идеальная» системная сеть для многопроцессорных вычислительных систем* // Управление большими системами. Выпуск 34. М.: ИПУ РАН. 2011. С. 92 – 116.  
URL: <http://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS3405.pdf>.
6. 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.
7. 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 // PACO`2008.: М.: ИПУ, 2008.
8. Alverson B., Roweth D., Kaplan L. *Cray XC<sup>R</sup> Series Network*, 28 p. URL: <http://www.cray.com/Assets/PDF/products/xc/CrayXC30Networking.pdf>.
9. Alverson R., Roweth D., Kaplan L. *CRAY INC.* // The Gemini System Interconnect // 18<sup>th</sup> IEEE Symposium on High Performance Interconnects. 2009. P. 83 – 87.

# FRAGMENTARY APPROACH TO DIAGNOSING OF COMPONENTS OF DIGITAL SYSTEMS WITH MINIMAL QUASICOMPLETE GRAPH STRUCTURES BY DIMENSION $7 \times 7$ WITH 2 PATHS BETWEEN 2 ABONENTS

**Victor Vedeshenkov**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, senior researcher associate (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, ([vva@ipu.ru](mailto:vva@ipu.ru))).

*Abstract: Two variants of fragmentary approach for diagnosing fragments with discriminated structures are worked out. Digital system (DC) in first variant are partitioned logically into seven fragments of the same structure: a commutator, four abonents and eight communication lines. In second variant seven abonents are tested one by one, the each fragment includes a commutator and eight communication lines. The operable diagnostic monitor (DM) tests the components of fragments by turns, decodes the derived syndromes and transmits the diagnosis to a servicer for repair of faulty components. Apparently the presented fragmentary approach is possibly used for diagnosing DS of similar structure with other parameters.*

Keywords: digital systems, abonent, commutator, communication line, fragmentary approach, decoding.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии*

*Поступила в редакцию  
Опубликовано*