

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ КОНТРОЛИРУЮЩЕГО ТЕСТА ДЛЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ СО СТРУКТУРОЙ МИНИМАЛЬНОГО КВАЗИПОЛНОГО ГРАФА (НА ПРИМЕРЕ ГРАФА РАЗМЕРА 11×11)

В.А. Ведешенков

Разработан новый метод построения контролирующего теста для цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа. Частные тесты сформированы для n фрагментов цифровой системы, каждый из которых состоит из коммутатора и $2m$ линий связи. Затем проверки частных тестов распределены в n групп с общими проверяющими абонентами. Множество из nm проверок представляет полный минимальный тест для одиночных неисправных компонентов цифровых систем рассматриваемой структуры. Приведен пример построения контролирующего теста для цифровой системы размера 11×11 . Отмечено, что предложенный метод можно применять для анализа цифровых систем рассматриваемой структуры с другими параметрами графа.

Ключевые слова: цифровая система, фрагмент, абонент, коммутатор, линия связи, минимальный квазиполный граф, контролирующий тест, частный тест.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье под цифровыми системами (ЦС) понимаются 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. В одной доле имеется n коммутаторов, а в другой — n абонентов. Для рассматриваемых топологий параметры n и m связаны соотношением $n = m(m - 1)/\sigma + 1$ и не могут быть взяты произвольно [1]. Значение m выбирается минимальным, при котором любые два узла в одной доле связаны σ путями длины два через разные узлы в другой доле. Каждый такой путь проходит через один коммутатор, и разные пути проходят через разные коммутаторы.

В число возможных областей применения графов с подобной новой структурой входят отказоустойчивые многомашинные вычислительные системы реального времени, где, например, под-

множество вершин одной доли представляет совокупность процессорных элементов или вычислительных машин, а подмножество вершин другой доли — совокупность коммутаторов [1, 2]. Для систем ответственного применения время их восстановления часто играет решающую роль, а потому должно быть по возможности минимальным. Выход известен — применение систем с автоматическим восстановлением работоспособности. Трудности построения подобных систем существенно возрастают с увеличением числа компонентов, влияние неисправностей которых нужно устранить автоматически. В связи с этим представляют безусловный интерес системы с автоматическим восстановлением работоспособности после отказа одного из компонентов системы [3]. Поскольку физический ремонт неисправного компонента не может производиться, то можно говорить о самовосстановлении работоспособности ЦС.

Для построения таких самовосстанавливаемых ЦС представляется безусловно полезным фрагментный подход, в котором необходимые процедуры (в том числе диагностические процедуры) выполняются над частью (фрагментом) ЦС [4, 5]. Обязательной частью фрагментного подхода [4] является применение диагностического монитора —

Таблица 1

Таблица взаимодействия компонентов ЦС размера 11×11

A_j	A_k										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	∅	13 14	14 16	16 19	12 16	13 19	14 19	12 19	13 16	12 14	12 13
2	13 14	∅	14 15	15 17	17 20	13 17	14 20	15 20	13 20	14 17	13 15
3	14 16	14 15	∅	15 16	16 18	18 21	14 18	15 21	16 21	14 21	15 18
4	16 19	15 17	15 16	∅	16 17	17 19	19 22	15 19	16 22	17 22	15 22
5	12 16	17 20	16 18	16 17	∅	17 18	18 20	12 20	16 20	12 17	12 18
6	13 19	13 17	18 21	17 19	17 18	∅	18 19	19 21	13 21	17 21	13 18
7	14 19	14 20	14 18	19 22	18 20	18 19	∅	19 20	20 22	14 22	18 22
8	12 19	15 20	15 21	15 19	12 20	19 21	19 20	∅	20 21	12 21	12 15
9	13 16	13 20	16 21	16 22	16 20	13 21	20 22	20 21	∅	21 22	13 22
10	12 14	14 17	14 21	17 22	12 17	17 21	14 22	12 21	21 22	∅	12 22
11	12 13	13 15	15 18	15 22	12 18	13 18	18 22	12 15	13 22	12 22	∅

Требуется разработать способ построения контролирующего теста для ЦС со структурой минимального квазиполного графа (на примере графа с параметрами $n = 11$, $m = 5$, $\sigma = 2$).

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходная ЦС имеет структуру минимального квазиполного графа $S_{n,m,\sigma}$, где n — число вершин (абонентов и коммутаторов) в каждой доле графа, m — число портов каждого коммутатора, $\sigma = 2$ — число путей между каждой парой абонентов, проходящих через разные коммутаторы. Структура конкретной ЦС представляется в табличном виде. (Таблица взаимодействия компонентов ЦС, рассматриваемой в качестве примера, показана в виде табл. 1, см. далее.)

Будем считать, что допускаются устойчивые редкие отказы одного из компонентов: абонента, коммутатора, линии связи, причем неисправности компонентов таковы, что прекращают работу тех компонентов, в которых они возникли, и не влияют на работоспособность других компонентов, не имеющих непосредственных связей с данным неисправным компонентом.

2. СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ КОНТРОЛИРУЮЩЕГО ТЕСТА ДЛЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ СО СТРУКТУРОЙ МИНИМАЛЬНОГО КВАЗИПОЛНОГО ГРАФА (НА ПРИМЕРЕ ГРАФА С ПАРАМЕТРАМИ $N = 11$, $M = 5$, $\Sigma = 2$)

Реализация фрагментного способа [5] основана на следующих положениях:

— неисправный компонент K_x не влияет на работоспособность других компонентов ЦС, а потому фактическое техническое состояние компонента K_x (исправен или подозревается в неисправности) можно определить только по результату той проверки, в выполнении которой участвует компонент K_x ;

— предположение об одном неисправном компоненте вследствие редкого потока их отказов поз-



воляет считать, что исправны все компоненты ЦС, кроме одного из тех, которые входят в состав фрагмента, в котором обнаружен неисправный компонент. Это означает, что действия (операции), выполняемые этими исправными компонентами ЦС, являются правильными, а их результаты достоверны;

— анализируемый фрагмент Φ_j включает в себя абонента $A_{k,2}$, коммутатор $C_{s,1}$ и линии связи $l(a_{j,1} - c_{s,1})$, $l(c_{s,1} - a_{k,2})$. Проверкой называется тестовая операция над компонентами фрагмента Φ_j , выполняемая следующим образом.

Исправный проверяющий абонент $A_{j,1}$ передает абоненту $A_{k,2}$ через коммутатор $C_{s,1}$ и соответствующие линии связи запрос (проверку) P_j . Абонент $A_{k,2}$, получив такое сообщение, подтверждает его получение абоненту $A_{j,1}$, который запоминает такой результат как оценку $r_j = 0$. Если в течение интервала Δt такого подтверждения от абонента $A_{k,2}$ не приходит, то абонент $A_{j,1}$ запоминает этот результат как оценку $r_j = 1$. Эти оценки используются абонентом $A_{j,1}$ для выбора последующих тестовых процедур.

В выполнении проверки P_j участвуют компоненты: проверяющий абонент $A_{j,1}$, линия связи $l(a_{j,1} - c_{s,1})$, коммутатор $C_{s,1}$, линия связи $l(c_{s,1} - a_{k,2})$, проверяемый абонент $A_{k,2}$.

Без названий компонентов состав проверки выглядит так:

$$P_j = A_{j,1}, l(a_{j,1} - c_{s,1}), C_{s,1}, l(c_{s,1} - a_{k,2}), A_{k,2}.$$

Как видно из этой записи, индексы линий связи однозначно определяются индексами компонентов, которые они соединяют. Для уменьшения длины записи исключим из нее символы линий связи, получим обозначение проверки, в котором показаны только символы «активных» компонентов (абонент, коммутатор):

$$P_j = A_{j,1} \rightarrow C_{s,1} \rightarrow A_{k,2}.$$

В рассматриваемом далее примере ЦС каждый «активный» компонент имеет свой номер, поэтому при записи проверок можно обойтись без символов компонентов, а писать только их номера. Например, далее в табл. 4 найдем такие проверки:

$$P_1 = 1 \rightarrow 12 \rightarrow 5, \quad P_6 = 2 \rightarrow 13 \rightarrow 1, \\ P_{31} = 7 \rightarrow 14 \rightarrow 10 \text{ и др.}$$

Каждый абонент ЦС связан с каждым другим абонентом двумя линиями связи, проходящими через два разных коммутатора. Пути проверок, проходящие между абонентами $A_{j,1}$ и $A_{k,2}$ в одном и

том же направлении, но через разные коммутаторы $C_{s,1}$ и $C_{t,2}$, назовем сопряженными. Коммутаторы $C_{s,1}$ и $C_{t,2}$ также будем называть сопряженными относительно абонентов $A_{j,1}$ и $A_{k,2}$.

Структура взаимодействия компонентов анализируемой ЦС показана в табл. 1. Строки и столбцы табл. 1 обозначены номерами абонентов $A_j, A_k, j, k = 1, \dots, 11$, соответственно. В клетке на пересечении j -й строки и k -го столбца записаны номера коммутаторов $C_{s,1}$ и $C_{t,2}$, $s, t = 12, \dots, 22$, через которые проходят сопряженные пути для данной пары абонентов. Так как связи между абонентами двусторонние, то номера коммутаторов $C_{s,1}$ и $C_{t,2}$, связывающих абонента j -й строки с абонентом k -го столбца, совпадают с номерами коммутаторов $C_{s,1}$ и $C_{t,2}$, связывающих абонента k -й строки с абонентом j -го столбца. Например, в клетках $j = 3, k = 7$ и $j = 7, k = 3$ записаны номера коммутаторов 14 и 18, являющихся сопряженными для абонентов 3 и 7. Поскольку каждую пару абонентов связывает «индивидуальная» пара путей, то такая пара коммутаторов записана только в этих двух клетках. Знаки \emptyset в диагональных клетках отражают тот факт, что абонент не взаимодействует сам с собой.

Основные требования к контролирующему тесту:

— каждая линия связи должна входить хотя бы в одну проверку, т. е. тестироваться не менее одного раза;

— в состав контролирующего теста должен входить только один из каждой пары сопряженных путей проверок, чтобы второй путь проверки можно было оставить в резерве.

В соответствии с записями табл. 1 в состав рассматриваемой ЦС входят одиннадцать абонентов с номерами 1, ..., 11, одиннадцать коммутаторов с номерами 12, ..., 22 и 110 линий связи между указанными абонентами и коммутаторами. Эти 110 линий связи объединены в 55 пар сопряженных путей проверок. Согласно упомянутым требованиям, в контролирующей тест должен входить только один путь из каждой пары сопряженных путей. Вариант контролирующего теста (см. работу [5]) был получен после нескольких попыток его построения потому, что выбор одного пути из каждой пары сопряженных путей зависит от ранее выбранных путей и приводит к перебору возможных вариантов.

Предлагаемая процедура построения контролирующего теста состоит из двух этапов:

— построение контролирующего теста для фрагмента F_i , состоящего из коммутатора C_i и десяти присоединенных к нему линий связи; назовем это подмножество проверок частным тестом коммута-

тора C_i (отметим, что по составу фрагмент F_i отличается от фрагмента Φ_j , упоминавшегося ранее);

— распределение проверок из n частных тестов для коммутаторов C_i в n групп с общим проверяющим абонентом $A_{j,1}$.

Такая двухэтапная процедура построения контролирующего теста приводит к существенному сокращению числа вариантов, перебираемых на втором этапе, благодаря их целенаправленному выбору.

2.1. Метод построения контролирующего теста для фрагментов цифровой системы со структурой минимального квазиполного графа (на примере графа с параметрами $n = 11$, $m = 5$, $\sigma = 2$)

Фрагмент F_i , состоящий из коммутатора C_i и десяти присоединенных линий связи, можно представить в виде звездообразного графа: центральная вершина (коммутатор C_i) и 5 пар дуг (линий связи), соединяющих центр с периферийными вершинами (абонентами $A_{j,1}, \dots, A_{j,5}$). Каждая проверка компонентов фрагмента F_i отображается на графе путем из одной вершины в другую, проходящим через центр и две дуги, соединяющие центр с этими вершинами. Для построения частного теста фрагмента F_i нужно обойти все вершины графа,

например, в порядке увеличения номеров вершин. В процессе такого обхода в одной проверке P_j будет протестирована линия связи от абонента A_j к коммутатору C_i , а в другой проверке P_k — инверсная линия связи от коммутатора C_i к абоненту A_j . После обхода всех вершин графа по одному разу будут протестированы все линии связи, прилегающие к коммутатору C_i . Таким образом, частный тест является полным для неисправных линий связи. Частный тест является минимальным, так как каждая линия связи входит только в одну проверку и потому тестируется только один раз.

Построив частные тесты для всех коммутаторов ЦС, получим множество проверок, необходимое и достаточное для построения полного контролирующего теста ЦС.

В табл. 2 показана реализация двух вариантов частных тестов для коммутаторов C_i , $i = 12, \dots, 22$. При ее построении приняты такие обозначения: левый столбец показывает номера коммутаторов C_i , нижний индекс которого (1 или 2) отражает номер рассматриваемого варианта частных тестов (о них подробнее будет сказано далее); второй столбец содержит номера абонентов, связанных с коммутатором C_i , причем порядок записи номеров отражает порядок их последующего обхода при пост-

Таблица 2

Таблица состава частных тестов для цифровой системы размера 11×11

Коммутатор C_i	Абоненты $A_{j,1}, A_{j,2}, A_{j,3}, A_{j,4}, A_{j,5}$	Пути проверок для коммутатора C_i
12_1	1, 5, 8, 10, 11	$1 \rightarrow 12 \rightarrow 5; 5 \rightarrow 12 \rightarrow 8; 8 \rightarrow 12 \rightarrow 10; 10 \rightarrow 12 \rightarrow 11; 11 \rightarrow 12 \rightarrow 1$
13_1 13_2	1, 2, 6, 9, 11 11, 9, 6, 2, 1	$1 \rightarrow 13 \rightarrow 2; 2 \rightarrow 13 \rightarrow 6; 6 \rightarrow 13 \rightarrow 9; 9 \rightarrow 13 \rightarrow 11; 11 \rightarrow 13 \rightarrow 1$ $11 \rightarrow 13 \rightarrow 9; 9 \rightarrow 13 \rightarrow 6; 6 \rightarrow 13 \rightarrow 2; 2 \rightarrow 13 \rightarrow 1; 1 \rightarrow 13 \rightarrow 11$
14_1	1, 2, 3, 7, 10	$1 \rightarrow 14 \rightarrow 2; 2 \rightarrow 14 \rightarrow 3; 3 \rightarrow 14 \rightarrow 7; 7 \rightarrow 14 \rightarrow 10; 10 \rightarrow 14 \rightarrow 1$
15_1 15_2	2, 3, 4, 8, 11 11, 8, 4, 3, 2	$2 \rightarrow 15 \rightarrow 3; 3 \rightarrow 15 \rightarrow 4; 4 \rightarrow 15 \rightarrow 8; 8 \rightarrow 15 \rightarrow 11; 11 \rightarrow 15 \rightarrow 2$ $11 \rightarrow 15 \rightarrow 8; 8 \rightarrow 15 \rightarrow 4; 4 \rightarrow 15 \rightarrow 3; 3 \rightarrow 15 \rightarrow 2; 2 \rightarrow 15 \rightarrow 11$
16_1	1, 3, 4, 5, 9	$1 \rightarrow 16 \rightarrow 3; 3 \rightarrow 16 \rightarrow 4; 4 \rightarrow 16 \rightarrow 5; 5 \rightarrow 16 \rightarrow 9; 9 \rightarrow 16 \rightarrow 1$
17_1 17_2	2, 4, 5, 6, 10 10, 6, 5, 4, 2	$2 \rightarrow 17 \rightarrow 4; 4 \rightarrow 17 \rightarrow 5; 5 \rightarrow 17 \rightarrow 6; 6 \rightarrow 17 \rightarrow 10; 10 \rightarrow 17 \rightarrow 2$ $10 \rightarrow 17 \rightarrow 6; 6 \rightarrow 17 \rightarrow 5; 5 \rightarrow 17 \rightarrow 4; 4 \rightarrow 17 \rightarrow 2; 2 \rightarrow 17 \rightarrow 10$
18_1	3, 5, 6, 7, 11	$3 \rightarrow 18 \rightarrow 5; 5 \rightarrow 18 \rightarrow 6; 6 \rightarrow 18 \rightarrow 7; 7 \rightarrow 18 \rightarrow 11; 11 \rightarrow 18 \rightarrow 3$
19_1 19_2	1, 4, 6, 7, 8 8, 7, 6, 4, 1	$1 \rightarrow 19 \rightarrow 4; 4 \rightarrow 19 \rightarrow 6; 6 \rightarrow 19 \rightarrow 7; 7 \rightarrow 19 \rightarrow 8; 8 \rightarrow 19 \rightarrow 1$ $8 \rightarrow 19 \rightarrow 7; 7 \rightarrow 19 \rightarrow 6; 6 \rightarrow 19 \rightarrow 4; 4 \rightarrow 19 \rightarrow 1; 1 \rightarrow 19 \rightarrow 8$
20_1	2, 5, 7, 8, 9	$2 \rightarrow 20 \rightarrow 5; 5 \rightarrow 20 \rightarrow 7; 7 \rightarrow 20 \rightarrow 8; 8 \rightarrow 20 \rightarrow 9; 9 \rightarrow 20 \rightarrow 2$
21_1 21_2	3, 6, 8, 9, 10 10, 9, 8, 6, 3	$3 \rightarrow 21 \rightarrow 6; 6 \rightarrow 21 \rightarrow 8; 8 \rightarrow 21 \rightarrow 9; 9 \rightarrow 21 \rightarrow 10; 10 \rightarrow 21 \rightarrow 3$ $10 \rightarrow 21 \rightarrow 9; 9 \rightarrow 21 \rightarrow 8; 8 \rightarrow 21 \rightarrow 6; 6 \rightarrow 21 \rightarrow 3; 3 \rightarrow 21 \rightarrow 10$
22_1 22_2	4, 7, 9, 10, 11 4, 7, 9, 11, 10	$4 \rightarrow 22 \rightarrow 7; 7 \rightarrow 22 \rightarrow 9; 9 \rightarrow 22 \rightarrow 10; 10 \rightarrow 22 \rightarrow 11; 11 \rightarrow 22 \rightarrow 4$ $4 \rightarrow 22 \rightarrow 7; 7 \rightarrow 22 \rightarrow 9; 9 \rightarrow 22 \rightarrow 11; 11 \rightarrow 22 \rightarrow 10; 10 \rightarrow 22 \rightarrow 4$



Таблица 3

роении частного теста; в третьем столбце показаны пути пяти проверок, образующих частный тест для коммутатора C_p , $i = 12, \dots, 22$.

Пути проверок, записанные в третьем столбце, образованы достаточно просто: между двумя смежными номерами абонентов из второго столбца вставляется номер коммутатора из первого столбца. Двигаясь от номера левого абонента вправо по клетке второго столбца, построим поочередно пять проверок, образующих частный тест для коммутатора с номером из клетки первого столбца.

Первый вариант контролирующего теста ЦС составлен из частных тестов, пути проверок которых построены в порядке увеличения номеров абонентов. Сравнение записей этого варианта выявило одиннадцать пар сопряженных путей проверок, показанных в табл. 3. Появление таких пар сопряженных путей проверок не случайно, оно является следствием структурных особенностей анализируемой ЦС, а именно, наличия двух путей между любой парой абонентов. Действительно, в табл. 1 нетрудно найти клетки, в которых находятся пары с четным и нечетным номерами коммутаторов, часть этих пар показана в табл. 3. Например, коммутаторы 13, 14 в клетках 1, 2 и 2, 1 табл. 1 входят в состав сопряженных проверок $P_{1,1}$ и $P_{1,2}$ в табл. 3, коммутаторы 14, 15 в клетках 2, 3 и 3, 2 табл. 1 — в состав проверок $P_{2,1}$ и $P_{2,2}$ в табл. 3 и т. д., ..., коммутаторы 21, 22 в проверках $P_{9,1}$ и $P_{9,2}$, коммутаторы 12, 13 в проверках $P_{11,1}$ и $P_{11,2}$.

Для того чтобы в состав контролирующего теста ЦС не входили пары сопряженных путей проверок, правило построения проверок в порядке увеличения номеров абонентов заменим на два таких правила:

- для коммутаторов с четными номерами пути проверок частных тестов строятся в порядке увеличения номеров абонентов,
- для коммутаторов с нечетными номерами пути проверок частных тестов строятся в инверсном порядке: в порядке уменьшения номеров абонентов.

Второе правило применено для построения частных тестов для коммутаторов с номерами 13, 15, 17, 19, 21. Полученные таким образом частные тесты показаны в строках табл. 2, отмеченных номерами коммутаторов с индексом 2. Нетрудно проверить, что инвертирование направления путей проверок в частных тестах для коммутаторов с нечетными номерами исключило десять из одиннадцати пар сопряженных путей проверок, показанных в табл. 3. Второе правило построения частных тестов не повлияло на частные тесты для коммутаторов 22 и 12 (естественно, это же четные номера). Поэтому в составе показанных частных тестов осталась десятая пара сопряженных комму-

Таблица сопряженных путей проверок

№ № п/п	Проверки
1	$P_{1,1} = 1 \rightarrow 13 \rightarrow 2$ $P_{1,2} = 1 \rightarrow 14 \rightarrow 2$
2	$P_{2,1} = 2 \rightarrow 14 \rightarrow 3$ $P_{2,2} = 2 \rightarrow 15 \rightarrow 3$
3	$P_{3,1} = 3 \rightarrow 15 \rightarrow 4$ $P_{3,2} = 3 \rightarrow 16 \rightarrow 4$
4	$P_{4,1} = 4 \rightarrow 16 \rightarrow 5$ $P_{4,2} = 4 \rightarrow 17 \rightarrow 5$
5	$P_{5,1} = 5 \rightarrow 17 \rightarrow 6$ $P_{5,2} = 5 \rightarrow 18 \rightarrow 6$
6	$P_{6,1} = 6 \rightarrow 18 \rightarrow 7$ $P_{6,2} = 6 \rightarrow 19 \rightarrow 7$
7	$P_{7,1} = 7 \rightarrow 19 \rightarrow 8$ $P_{7,2} = 7 \rightarrow 20 \rightarrow 8$
8	$P_{8,1} = 8 \rightarrow 20 \rightarrow 9$ $P_{8,2} = 8 \rightarrow 21 \rightarrow 9$
9	$P_{9,1} = 9 \rightarrow 21 \rightarrow 10$ $P_{9,2} = 9 \rightarrow 22 \rightarrow 10$
10	$P_{10,1} = 10 \rightarrow 22 \rightarrow 11$ $P_{10,2} = 10 \rightarrow 12 \rightarrow 11$
11	$P_{11,1} = 11 \rightarrow 12 \rightarrow 1$ $P_{11,2} = 11 \rightarrow 13 \rightarrow 1$

таторов 22, 12 в проверках $P_{10,1} = 10 \rightarrow 22 \rightarrow 11$ и $P_{10,2} = 10 \rightarrow 12 \rightarrow 11$. Дело в том, что номер 22 — четный, а благодаря нечетному числу абонентов ($n = 11$) номер 22 в частных тестах соседствует с другим четным номером 12. Для исключения этой пары сопряженных проверок сделаем такую коррекцию: изменим на инверсное направление путь проверки ($10 \rightarrow 22 \rightarrow 11$) и скорректируем те пути проверок для коммутатора 22, которые выполняются до и после этой проверки. В результате таких действий получим частный тест, показанный в строке 22₂.

Таким образом, два предложенных правила построения частных тестов хорошо работают для ЦС с четным числом коммутаторов n , но требуют дополнительной коррекции одного частного теста при нечетном числе коммутаторов.

2.2. Метод построения контролирующего теста для цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа (на примере графа с параметрами $n = 11$, $m = 5$, $\sigma = 2$)

Множество путей проверок частных тестов для коммутаторов с номерами 12₁, 14₁, 16₁, 18₁, 20₁ и 13₂, 15₂, 17₂, 19₂, 21₂, 22₂, показанных в табл. 2, яв-

ляется необходимым и достаточным для построения контролирующего теста ЦС, удовлетворяющего заданным требованиям. Но для получения достоверных результатов их выполнения нужны исправные проверяющие абоненты $A_j, j = 1, \dots, 11$. Чтобы удовлетворить этому требованию, будем назначать очередную проверку P_j к выполнению только в том случае, если исправность проверяющего абонента $A_{j,1}$ подтверждена в ранее выполненных проверках.

Таблица 4

 Таблица контролирующего теста для ЦС размера 11×11

B_j	Проверки $P_{j,1} = A_j \rightarrow C_i \rightarrow A_k$	B_j	Проверки $P_{j,1} = A_j \rightarrow C_i \rightarrow A_k$
1	$P_1 = 1 \rightarrow 12 \rightarrow 5$	31	$P_{31} = 7 \rightarrow 14 \rightarrow 10$
2	$P_2 = 1 \rightarrow 13 \rightarrow 11$	32	$P_{32} = 7 \rightarrow 18 \rightarrow 11$
3	$P_3 = 1 \rightarrow 14 \rightarrow 2$	33	$P_{33} = 7 \rightarrow 19 \rightarrow 6$
4	$P_4 = 1 \rightarrow 16 \rightarrow 3$	34	$P_{34} = 7 \rightarrow 20 \rightarrow 8$
5	$P_5 = 1 \rightarrow 19 \rightarrow 8$	35	$P_{35} = 7 \rightarrow 22 \rightarrow 9$
6	$P_6 = 2 \rightarrow 13 \rightarrow 1$	36	$P_{36} = 8 \rightarrow 12 \rightarrow 10$
7	$P_7 = 2 \rightarrow 14 \rightarrow 3$	37	$P_{37} = 8 \rightarrow 15 \rightarrow 4$
8	$P_8 = 2 \rightarrow 15 \rightarrow 11$	38	$P_{38} = 8 \rightarrow 19 \rightarrow 7$
9	$P_9 = 2 \rightarrow 17 \rightarrow 10$	39	$P_{39} = 8 \rightarrow 20 \rightarrow 9$
10	$P_{10} = 2 \rightarrow 20 \rightarrow 5$	40	$P_{40} = 8 \rightarrow 21 \rightarrow 6$
11	$P_{11} = 3 \rightarrow 14 \rightarrow 7$	41	$P_{41} = 9 \rightarrow 13 \rightarrow 6$
12	$P_{12} = 3 \rightarrow 15 \rightarrow 2$	42	$P_{42} = 9 \rightarrow 16 \rightarrow 1$
13	$P_{13} = 3 \rightarrow 16 \rightarrow 4$	43	$P_{43} = 9 \rightarrow 20 \rightarrow 2$
14	$P_{14} = 3 \rightarrow 18 \rightarrow 5$	44	$P_{44} = 9 \rightarrow 21 \rightarrow 8$
15	$P_{15} = 3 \rightarrow 21 \rightarrow 10$	45	$P_{45} = 9 \rightarrow 22 \rightarrow 11$
16	$P_{16} = 4 \rightarrow 15 \rightarrow 3$	46	$P_{46} = 10 \rightarrow 12 \rightarrow 11$
17	$P_{17} = 4 \rightarrow 16 \rightarrow 5$	47	$P_{47} = 10 \rightarrow 14 \rightarrow 1$
18	$P_{18} = 4 \rightarrow 17 \rightarrow 2$	48	$P_{48} = 10 \rightarrow 17 \rightarrow 6$
19	$P_{19} = 4 \rightarrow 19 \rightarrow 1$	49	$P_{49} = 10 \rightarrow 21 \rightarrow 9$
20	$P_{20} = 4 \rightarrow 22 \rightarrow 7$	50	$P_{50} = 10 \rightarrow 22 \rightarrow 4$
21	$P_{21} = 5 \rightarrow 12 \rightarrow 8$	51	$P_{51} = 11 \rightarrow 12 \rightarrow 1$
22	$P_{22} = 5 \rightarrow 16 \rightarrow 9$	52	$P_{52} = 11 \rightarrow 13 \rightarrow 9$
23	$P_{23} = 5 \rightarrow 17 \rightarrow 4$	53	$P_{53} = 11 \rightarrow 15 \rightarrow 8$
24	$P_{24} = 5 \rightarrow 18 \rightarrow 6$	54	$P_{54} = 11 \rightarrow 18 \rightarrow 3$
25	$P_{25} = 5 \rightarrow 20 \rightarrow 7$	55	$P_{55} = 11 \rightarrow 22 \rightarrow 10$
26	$P_{26} = 6 \rightarrow 13 \rightarrow 2$		
27	$P_{27} = 6 \rightarrow 17 \rightarrow 5$		
28	$P_{28} = 6 \rightarrow 18 \rightarrow 7$		
29	$P_{29} = 6 \rightarrow 19 \rightarrow 4$		
30	$P_{30} = 6 \rightarrow 21 \rightarrow 3$		

В табл. 4 показан вариант контролирующего теста для данной ЦС, построенный на основе приведенных проверок P_j из табл. 2. При формировании табл. 4 все 55 проверок частных тестов распределены в 11 групп, в каждой из которых 5 проверок имеют общий проверяющий абонент A_j (имеют один и тот же номер). Правила заполнения строк каждой группы просты: из табл. 3 выбираются те проверки, для которых абонент A_j является общим. Количество проверок в каждой группе равно значению m — числу портов у абонента и коммутатора. Упорядочивать проверки в каждой группе можно по разным критериям, например, в табл. 4 проверки записаны в порядке увеличения номеров коммутаторов.

Сформированная таким образом таблица контролирующего теста (см. табл. 4) содержит $R = n \times m = 55$ проверок P_j , что естественно совпадает с числом проверок в табл. 2, так как оно определяется числом линий связи в рассматриваемой ЦС.

Отметим, что порядок использования абонентов в качестве проверяющих, показанный в табл. 4, не является единственно возможным. Результат исполнения каждой проверки зависит от технического состояния ее проверяемых компонентов и проверяющего абонента A_j . Поэтому группы проверок с общим проверяющим абонентом A_j можно менять местами при условии, что исправность абонента A_j данной группы подтверждена ранее выполненными проверками. Так, в табл. 4 после исполнения первых 25 проверок будет протестирован хотя бы по одному разу каждый из 11 абонентов, в том числе абонент 6 проверкой P_{24} . Поэтому перестановка местами групп проверок с абонентами 6—11 никак не повлияет на достоверность результатов исполнения проверок с номерами 26—55 (см. табл. 4).

Напомним порядок выполнения контролирующего теста ЦС. Сначала выполняются проверки P_1, \dots, P_5 , в которых проверяющим служит абонент 1. После успешного выполнения этих проверок абонент 1 передает управление абоненту 2 для выполнения проверок P_6, \dots, P_{10} . После успешного выполнения этих проверок абонент 2 передает управление абоненту 3 для тестирования проверок P_{11}, \dots, P_{15} и т. д. Из записей табл. 4 видно, что исправность абонента 2 будет подтверждена проверкой P_3 , а исправность абонента 3 — проверкой P_4 и т. д. При неудачном результате выполнения любой проверки абонент A_j , зафиксировавший такой исход, переходит к диагностированию неисправного компонента и устранению его влияния на работоспособность ЦС [4, 5].



Проверка P_1 , для которой проверяющим служит абонент 1, может нарушить этот порядок: в случае неисправности абонента 1 система контроля остановится. Чтобы устранить влияние неисправности абонента 1, нужно запустить контролирующий тест с другого начального абонента, например, с абонента 2. Для такой оперативной замены начального абонента можно воспользоваться следующим вариантом действий.

При проектировании системы контроля ЦС организуем ее запуск по сигналам системных часов. Пусть запуск абонента 1 в качестве начального абонента контролирующего теста ЦС запланирован на момент времени T_0 , а запуск абонента 2 в качестве начального абонента контролирующего теста ЦС запланирован на момент времени $T_0 + \Delta T$, где интервал ΔT определен, например, экспериментально.

При успешном выполнении проверки P_1 абонент 1 передает абоненту 2 сигнал блокировки запуска системы контроля от системных часов (в момент времени $T_0 + \Delta T$) и таким образом предотвращает двойной запуск системы контроля ЦС. Если же проверка P_1 не выполнена, в том числе, и из-за неисправности абонента 1, то абонент 1 не отправит абоненту 2 команду на блокировку запуска системы контроля. В этом случае абонент 2 в момент времени $T_0 + \Delta T$ запустит систему контроля с проверки P_6 . В предположении, что в ЦС есть только один неисправный компонент, такая замена начального абонента позволит гарантированно запустить контролирующий тест, а в случае обнаружения неисправного компонента — перейти к этапам диагностирования и устранения влияния локализованного неисправного компонента, в том числе, и абонента 1.

Приведенные правила построения частных тестов для отдельных коммутаторов и контролирующего теста для всей ЦС сравнительно просто распространяются на ЦС с другими значениями параметров n и m . Действительно, частные тесты для одного коммутатора имеют m проверок, а контролирующий тест для ЦС распределяет проверки частных тестов n коммутаторов в n групп с общим проверяющим абонентом. Исключение составляют ЦС с нечетным значением n , для которых нужна коррекция частных тестов для одного коммутатора. Таким образом, контролирующий тест ЦС с параметрами n и m содержит $R = (n \times m)$ проверок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый метод построения контролирующего теста для цифровых систем со структурой

минимального квазиполного графа. Частные тесты сформированы для n фрагментов ЦС, каждый из которых состоит из коммутатора и $2m$ линий связи. Затем проверки частных тестов распределены в n групп с общими проверяющими абонентами. Множество из nm проверок представляет полный минимальный тест для одиночных неисправных компонентов ЦС рассматриваемой структуры. Приведен пример построения контролирующего теста для ЦС размера 11×11 .

Предложенный метод построения контролирующего теста достаточно общий и может быть применен для анализа ЦС со структурой минимального квазиполного графа с параметрами графа, отличными от рассмотренного примера. Но параметры n и m должны удовлетворять соотношению $n = m(m - 1)/\sigma + 1$ [1]. Что касается параметра σ — числа путей между двумя абонентами, проходящих через σ коммутаторов, то этот параметр не влияет на процедуры построения частных тестов отдельных фрагментов. Но для диагностирования и устранения влияния неисправного компонента в ЦС необходимо значение $\sigma = 2$ [4, 5].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Каравай М.Ф., Подлазов В.С.* Распределенный полный коммутатор как «идеальная» системная сеть для многопроцессорных вычислительных систем // Управление большими системами. — 2011. — Вып. 34. — С. 92—116. — URL: <http://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS3405.pdf> (дата обращения 22.11.2017).
2. *Alverson B., Froese E., Kaplan L., Roweth D.* Cray XCTM Series Network, WP-Aries01-1112. — 2012. Cray Inc., 2012. — 28 p. — URL: <http://www.cray.com/sites/default/files/resources/CrayXCNetwork.pdf> (дата обращения: 24.11.2017).
3. *Ведешенков В.А.* Организация диагностирования одиночных неисправных компонентов цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7 с двумя путями между двумя абонентами // Проблемы управления. — 2016. — № 1. — С. 65—72.
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.* Фрагментный способ восстановления работоспособности цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа с двумя путями между двумя абонентами (на примере графа размера 11×11) // Автоматика и телемеханика. — 2018. — № 3. — С. 76—91.

Статья представлена к публикации членом редсовета чл.-корр. РАН П.П. Пархоменко.

Ведешенков Виктор Алексеевич — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.