Техническая диагностика
2004. №1(7)

УДК 681.518.5

© 2004 г. **В.В. Воронин**, канд. техн. наук,
В.А. Порубенко
(Хабаровский государственный технический университет)

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЕМКОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРОВЕРОК

На примере простой диагностической цепи исследуются информационные свойства диагностических проверок, выполняемых способом функциональных проб. Приводятся результаты анализа информационной емкости для двух типов проверок (1:1) и (1:*M*).

Введение

Факт того, что элементы множества возможных диагностических проверок (далее проверок) имеют различные наборы свойств, не вызывает сомнений. Существенными свойствами фиксированной проверки принято считать следующие: вероятность отказа объекта проверки, доступность объекта проверки, сложность и информационная емкость самой проверки. Сложность проверки, реализуемой способом функциональной пробы, складывается из двух частей – структурной и сигнальной.

Способ функциональных проб применяется для функционирующих объектов и заключается в подаче на объект проверки входных допустимых сигналов с последующей фиксацией выходной реакции и сравнении последней с эталонным значением. Сигнальная сложность характеризует сложность входных и выходных сигналов. Структурная сложность определяется числом входных каналов и числом контрольных точек, а также числом диагностических блоков, охваченных проверкой.

В данной работе исследуется информационная емкость проверки в зависимости от параметров ее структурной сложности. Уровень сигнальной сложности принимается простейшим, а именно: используются бинарные сигналы {“сигнал в норме”, “сигнал не в норме”}. В качестве объекта возможных проверок выбран также простейший вариант – простая диагностическая цепь.

Информационная емкость проверки оценивается для каждого возможного исхода проверки и делится на две составляющие. Первая составляющая характеризует достигаемый в результате проверки уровень определенности технического состояния (*ТС*) объекта диагностирования, вторая – остаточную после проверки неопределенность *ТС*.

Пусть объектом возможных проверок является простая диагностическая цепь (*ДЦ*), включающая для определенности, – например, четыре диагностических блока (*ДБ*).

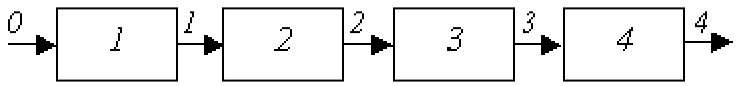

Рис. 1. Простая диагностическая цепь.

Структура цепи приведена на рис. 1. Такой объект проверок допускает возможность функциональных проб двух видов (1:1) и (1:*M*). Первый вид имеет один входной канал и одну контрольную точку (*КТ)*; второй – один входной канал и более одной контрольной точки ($M > 1$). Начнем анализ с проверок вида (1:1). Классификация таких проверок приведена в [1].

Анализ информационной емкости проверок вида (1:1)

Число N различных возможных проверок этого вида для простой диагностической цепи можно вычислить по формуле

$$N = C_n^1 + C_n^n + \sum_{i=2}^{n-1} C_n^i / 2, \tag{1}$$

где C – число сочетаний; n – число *ДБ* в простой цепи. Все множество возможных проверок разобьем на m классов. В класс K_i , $i=1,m$ входят проверки, охватывающие i блоков.

Для объекта проверки на рис. 1 класс K_1 включает четыре проверки: $\pi_{(0,1)}$, $\pi_{(1,2)}$, $\pi_{(2,3)}$ и $\pi_{(3,4)}$. Например, проверка $\pi_{(2,3)}$ имеет входной канал номер 2*,* контрольную точку номер 3 (см. рис. 1) и проверяет третий блок. Класс K_2 имеет три проверки $\pi_{(0,2)}$, $\pi_{(1,3)}$ и $\pi_{(2,4)}$. Проверка $\pi_{(2,4)}$ имеет входной канал номер 2, контрольную точку – номер 4 и охватывает два блока с номерами 3 и 4. Класс K_3 имеет две проверки: $\pi_{(0,3)}$ и $\pi_{(1,4)}$, охватывающие по три блока; класс K_4 – одна проверка $\pi_{(0,4)}$ для всех блоков.

Выделенные классы являются классами эквивалентности относительно информационной емкости. Все проверки фиксированного класса имеют одинаковую емкость. Поэтому будем анализировать не все возможные проверки, а только выделенные ранее классы.

Таблица 1

	(+)		(–)	
	α	β	α	β
K_1	1	8	1	8
K_2	2	4	0	12
K_3	3	2	0	14
K_4	4	0	0	15

В табл. 1 приведены результаты анализа информационной емкости возможных проверок для простой диагностической цепи (см. рис. 1). Дадим комментарий к таблице.

Первые два столбца, объединенные в один комплексный столбец и отмеченные символом (+)*,* соответствуют положительным результатам проверок вида (1:1). Например, если на вход второго блока подается нормальный сигнал и на выходе этого блока регистрируется также нормальный сигнал, то это означает, что проверка $\pi_{(1,2)}$ дает положительный результат.

Последний комплексный столбец, отмеченный символом (–), соответствует отрицательному результату. Например, если на входе первого блока сигнал в норме, а на выходе второго блока сигнал не в норме, то проверка $\pi_{(0,2)}$ дает отрицательный результат. Первые подстолбцы в комплексных столбцах, в заголовках которых стоит символ α, содержат значения первой составляющей информационной емкости, а столбцы с символом β в заголовках – вторую составляющую. Составляющая α характеризует достигнутый проверкой результат и количественно равна числу блоков, *ТС* которых установлено данной проверкой достоверно. Все проверки класса K_1 независимо от результата проверки фиксируют достоверно техническое состояние одного блока (см. первую строку табл. 1). При положительном результате проверки фиксируется исправное *ТС* блока (объекта проверки), а при отрицательном результате – неисправное.

Для проверок классов K_2 – K_4 при положительном результате устанавливается исправность всех i-блоков, где i – индекс класса. Например, положительный результат проверки $\pi_{(0,4)}$ говорит о том, что все четыре блока исправны (число 4 в первом столбце четвертой строки). Отрицательный результат проверок этих классов не фиксирует *ТС* ни одного блока (см. третий столбец и строки 2 – 4). Такой результат исключает из дальнейшего процесса диагностирования лишь несколько из 16 ($2^n = 16$) возможных состояний.

Например, проверка $\pi_{(1,4)}$ при отрицательном результате исключает два состояния, содержательный смысл которых – «второй, третий и четвертый блоки исправны, а первый либо исправен, либо неисправен». В условных обозначениях эти исключенные состояния представляются как (x111). Символ x здесь означает, что относительно первого блока данная проверка не несет никакой информации. Единственная проверка из класса K_4 исключает лишь одно состояние – (1111).

Вторая составляющая информационной емкости (см. подстолбцы β в табл. *1*) характеризует остаточную неопределенность и равна числу возможных после проверки состояний. Так, при положительном результате проверки из класса K_1 неопределенными остаются *8* состояний (их условные обозначения 1xxx для $\pi_{(0,1)}$, x1xx – $\pi_{(1,2)}$, xx1x – $\pi_{(2,3)}$, xxx1 – $\pi_{(3,4)}$), аналогичная ситуация и при отрицательном результате (0xxx, x0xx, xx0x, xxx0).

В классе K_2 при положительном результате неопределенными остаются 4 состояния (например, для $\pi_{(0,2)}$ имеем условную ситуацию (11xx), которая соответствует возможным неопределенным состояниям 1100, 1101, 1110, 1111), при отрицательном результате эти 4 состояния исключаются и остаются неопределенными 16 – 4 = 12 состояний. Сумма чисел в подстолбцах β, за исключением класса K_4, равна числу возможных состояний. Для удобства сравнения составляющих информационной емкости произведем нормирования столбцов табл. 1. Значения составляющей α нормируем относительно числа n блоков в простой цепи, а β – относительно числа m возможных состояний цепи. Результаты нормирования приведены в табл. 2.

Таблица 2

K_i	(+)		(–)		I	E
	α/n	β/m	α/n	β/m		
K_1	0.25	0.500	0.25	0.500	1.000	0.453
K_2	0.50	0.250	0.00	0.750	0.333	0.954
K_3	0.75	0.125	0.00	0.875	0.714	2.414
K_4	1.00	0.000	0.00	0.938	1.067	3.733

Таблица 3

K_i	(+)		(–)		I
	α/n	β/m	α/n	β/m	
K_1	0.2	0.500	0.2	0.500	1.000
K_2	0.4	0.250	0.0	0.750	0.200
K_3	0.6	0.125	0.0	0.875	0.543
K_4	0.8	0.063	0.0	0.938	0.736
K_5	1.0	0.000	0.0	0.969	1.032

Будем сравнивать проверки по критерию (2), где в числителе и знаменателе отношения находятся соответственно модулю разности нормированной емкости для положительного и отрицательного исходов проверки. В предпоследнем столбце табл. 2 приведены значения критерия (2). О последнем столбце таблицы будет сказано ниже.

$$I = \frac{\left|\alpha/n - \beta/m\right|_{(+)}}{\left|\alpha/n - \beta/m\right|_{(-)}}. \quad (2)$$

Аналогичные результаты для случаев n = 5 и n = 6 приведены соответственно в табл. 3 и табл. 4. Характер изменения критерия (2) в этих таблицах имеет одинаковые свойства.

Таблица 4

K_i	(+)		(–)		I
	α/n	β/m	α/n	β/m	
K_1	0.17	0.500	0.17	0.500	1.000
K_2	0.33	0.250	0.00	0.750	0.107
K_3	0.50	0.125	0.00	0.875	0.429
K_4	0.66	0.063	0.00	0.938	0.637
K_5	0.83	0.031	0.00	0.969	0.825
K_6	1.00	0.000	0.00	0.984	1.015

Анализ зависимостей (2) позволяет сформулировать следующие выводы. Во-первых, чем больше *ДБ* охвачено проверкой, за исключением проверок класса K_1, тем больше ее информационная емкость. Во-вторых, информационная емкость проверок K_1 не зависит от числа *ДБ* в простой цепи и всегда равна единице. В-третьих, максимальную емкость имеет единственная проверка класса K_n, но величина критерия (2) с ростом n убывает и асимптотически стремится к 1. Учитывая три предыдущих суждения, можно сделать синтетический вывод о том, что проверки классов K_1 и K_n занимают особое положение во множестве возможных проверок. Их особенность становится очевидной из следующих двух рекомендаций.

Если технология поиска предполагает сочетание проверок с немедленным восстановлением неисправных блоков, то рекомендуется в алгоритме поиска выбор проверок осуществлять из класса K_1 по максимальному значению отношения $P_i\ /C_i$, где P_i, C_i – соответственно вероятность неисправности и удельная стоимость проверки i-го *ДБ*. Каждый факт выявленной неисправности предполагает ремонт неисправного блока, после чего в алгоритме поиска должна быть выполнена проверка из класса K_n. При положительном исходе этой проверки поиск заканчивается, а при отрицательном – выбор и реализация очередной проверки из K_1. Представим формальное описание данной рекомендации в виде процедуры *П*1.

Процедура П1. «Сочетание операций поиска и ремонта».

Шаг 1. Определить массив $R(i)$ значений P_i/C_i, $i=\overline{1,n}$ для класса K_1.

Шаг 2. Выполнить проверку $\pi_{(0,n)}$. Если ее результат положительный, то переход на шаг 7, иначе на шаг 3.

Шаг 3. Найти в R неотмеченный элемент с максимальным значением. Запомнить его индекс i, отметить данный элемент.

Шаг 4. Выполнить проверку $\pi_{(i-1,i)}$.

Шаг 5. Если результат проверки $\pi_{(i-1,i)}$ положителен, то переход на шаг 3, иначе переход на шаг 6.

Шаг 6. Отремонтировать i-й блок. Переход на шаг 2.

Шаг 7. Фиксация результата.

Ясно, что если выполнены в любой последовательности все проверки из класса K_1, то *ТС* произвольного блочного объекта (не только простой *ДЦ*) будет установлено однозначно при любой кратности неисправностей. Такой универсальный и в то же время тривиальный алгоритм далеко не всегда эффективен и реализуем. Однако он служит хорошей базой для сравнения алгоритмов диагностирования.

В том случае, когда технология поиска предписывает сначала найти все неисправные блоки, а лишь затем осуществить их ремонт, рекомендуется после проверки $\pi_{(0,n)}$ назначить следующей такую проверку, у которой согласно выражению (3), значение V максимально.

$$V = \frac{\theta + \alpha / n^{(+)}}{C}. \qquad (3)$$

Здесь θ – вероятность исправного состояния всех блоков, охваченных проверкой; C – удельная стоимость проверки; $\alpha/n^{(+)}$ – нормированная составляющая информационной емкости при положительном результате (см. табл. 2 – 4). Другими словами, данное эвристическое правило рекомендует на начальной стадии поиска выявить исправную подцепь максимальной длины с минимальными затратами, а на завершающем этапе использовать проверки из класса K_1. Формальная процедура поиска с рассмотренной эвристикой потребует вычисления сложных вероятностей исправных состояний [2].

Анализ информационной емкости проверок вида (1:*M*)

Проанализируем информационную емкость функциональных проб вида (1:*M*) при $M = 2$ для той же простой *ДЦ* (см. рис. 1). Число возможных проверок этого вида вычисляется согласно выражению

$$N = \sum_{i=2}^{n} C_i^2 = 10.$$

Разобьем множество возможных проверок на шесть классов эквивалентности. Элементы, принадлежащие данному классу, имеют одинаковую информационную емкость. Индексы в условных обозначениях выделенных классов $K_{i,j}$ означают: i – число блоков между точкой приложения входного воздействия и первой контрольной точкой; j – число диагностических блоков между заданными контрольными точками. Введенные классы и их состав перечислены в первых двух столбцах табл. 5.

Таблица 5

$K_{i,j}$	π	00		10		11		01	
		α	β	α	β	α	β	α	β
$K_{1,1}$	$\pi_{[0,(1,2)]}$; $\pi_{[1,(2,3)]}$; $\pi_{[2,(3,4)]}$	1	8	2	4	2	4	*	*
$K_{1,2}$	$\pi_{[0,(1,3)]}$; $\pi_{[1,(2,4)]}$	1	8	1	8	3	2	*	*
$K_{2,1}$	$\pi_{[0,(2,3)]}$; $\pi_{[1,(3,4)]}$	0	12	3	2	3	2	*	*
$K_{1,3}$	$\pi_{[0,(1,4)]}$	1	8	1	8	4	0	*	*
$K_{3,1}$	$\pi_{[0,(3,4)]}$	0	14	4	0	4	0	*	*
$K_{2,2}$	$\pi_{[0,(2,4)]}$	0	12	2	4	4	0	*	*

Условное обозначение проверки $\pi_{[i,(j,k)]}$ означает, что входной сигнал имеет номер i, первая контрольная точка – номер j, вторая *КТ* – это сигнал k и $k > j > i$.

Таблица *6*

$K_{i,j}$	*00*		*10*		*11*		E
	α/n	β/m	α/n	β/m	α/n	β/m	
$K_{1,1}$	0.25	0.500	0.50	0.250	0.50	0.250	1.074
$K_{1,2}$	0.25	0.500	0.25	0.500	0.75	0.125	1.296
$K_{2,1}$	0.00	0.750	0.75	0.125	0.75	0.125	2.137
$K_{1,3}$	0.25	0.500	0.25	0.500	1.00	0.000	2.778
$K_{3,1}$	0.00	0.875	1.00	0.000	1.00	0.000	4.966
$K_{2,2}$	0.00	0.750	0.50	0.250	1.00	0.000	2.953

В табл. 5 четыре комплексных столбца. Они имеют заголовки 00, 10, 11 и 01, которые соответствуют формально возможным результатам проверки данного вида. Например, 10 означает, что в первой *КТ* получен положительный результат, а во второй – отрицательный. Результат 01 не соответствует реальной возможности, он противоречит диагностической логике. Точнее он противоречит эвристике шунтирования, согласно которой фиксированная неисправность транспортируется во все последующие точки диагностической цепи. Поэтому если в первой *КТ* получен отрицательный результат, то в последующей второй *КТ* не может быть получен положительный результат. Этот факт в последнем комплексном столбце табл. 5 отмечен тем, что все его ячейки хранят специальный знак - (*). Остальные ячейки табл. 5 содержат составляющие информационной емкости, нормированные значения которых приведены в табл. 6 (аналогию табл. 2).

Для сравнительного анализа проверок вида (1:*M*) критерий (2) не годится. Для этой цели воспользуемся выражением

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \dfrac{\alpha_i / n + a}{\beta_i / m + b}}{N - 1}, \qquad (4)$$

где N – число возможных результатов проверки вида (1:*M*); n – число *ДБ* в простой цепи. В рассматриваемой ситуации $N = n = 4$. Коэффициенты a и b введены для того, чтобы исключить нулевые значения в числителе и знаменателе отношения (4). Их значения можно задать в виде процента от максимальных значений величин α и β. Значения критерия (4) для $a = 0.4$ и $b = 0.14$ приведены в последнем столбце табл. 6. Максимальное значение имеет единственная проверка класса $K_{3,1}$. Эта проверка для двух возможных результатов (10 и 11) однозначно фиксирует техническое состояние простой цепи.

В табл. 7 и табл. 8 приведены аналогичные результаты для простой диагностической цепи (см. рис. 1) при $n = 5$. Критерий (3) имеет смысл и по отношению к проверкам вида (1:1). В последнем столбце табл. 2 – его значения для этих проверок. В данном случае (4) проявляет свойство монотонности в зависимости от числа *ДБ*, охваченных проверкой.

Заключение

Простая *ДЦ* и логическая модель с аналогичной структурой – это не эквивалентные понятия. В этих моделях функциональные пробы имеют различный смысл. В логической модели при допустимых входах проверяется допустимость сигналов в контрольных точках, а в простой *ДЦ* выполнение функциональной пробы может характеризоваться сложной процедурой, хотя ее результат также является бинарным.

Важность понятия простой *ДЦ* аргументируется тем, что предлагается рабочая гипотеза о разложимости полной диагностической модели на подмножество простых цепей и связывающих их особенных *ДБ*. Простая *ДЦ* – это основной декомпозиционный фрагмент полной диагностической модели.

Экспертная диагностическая система должна заключать в себе по возможности большинство диагностических идей, а именно: сочетание в алгоритме диагностирования процессов поиска и процессов восстановления; поиск без учета кратностей и с учетом таковых; поиск всех кратностей и только после этого восстановление; возможность изменения структуры объекта проверки; способ функциональных проб и способ замены; важность органолептических методов и техническая оценка параметров сопутствующих полей объекта и др.

Таблица 7

$K_{i,j}$	π	00		10		11	
		α	β	α	β	α	β
$K_{1,1}$	$\pi_{[0,(1,2)]}$; $\pi_{[1,(2,3)]}$; $\pi_{[2,(3,4)]}$; $\pi_{[0,(1,2)]}$	1	16	2	8	2	8
$K_{1,2}$	$\pi_{[0,(1,3)]}$; $\pi_{[1,(2,4)]}$; $\pi_{[2,(3,5)]}$	1	16	1	16	3	4
$K_{2,1}$	$\pi_{[0,(2,3)]}$; $\pi_{[1,(3,4)]}$; $\pi_{[2,(4,5)]}$	0	24	3	4	3	4
$K_{2,2}$	$\pi_{[0,(2,4)]}$; $\pi_{[1,(3,5)]}$	0	24	2	8	4	2
$K_{1,3}$	$\pi_{[0,(1,4)]}$; $\pi_{[1,(2,5)]}$	1	16	1	16	4	2
$K_{3,1}$	$\pi_{[0,(3,4)]}$; $\pi_{[1,(4,5)]}$	0	28	4	2	4	2
$K_{2,3}$	$\pi_{[0,(2,3)]}$	0	24	3	4	3	4
$K_{3,2}$	$\pi_{[0,(3,5)]}$	0	28	3	4	5	0
$K_{1,4}$	$\pi_{[0,(1,5)]}$	1	16	1	16	5	0
$K_{4,1}$	$\pi_{[0,(4,5)]}$	0	30	5	0	5	0

Таблица 8

$K_{i,j}$	00		10		11		E
	α/n	β/m	α/n	β/m	α/n	β/m	
$K_{1,1}$	0.2	0.500	0.4	0.250	0.4	0.250	0.877
$K_{1,2}$	0.2	0.500	0.2	0.500	0.6	0.125	1.055
$K_{2,1}$	0.0	0.750	0.6	0.125	0.6	0.125	1.625
$K_{2,2}$	0.0	0.750	0.4	0.250	0.8	0.063	1.770
$K_{1,3}$	0.2	0.500	0.2	0.500	0.8	0.063	1.629
$K_{3,1}$	0.0	0.875	0.8	0.063	0.8	0.063	2.774
$K_{2,3}$	0.0	0.750	0.6	0.125	0.6	0.125	2.601
$\mathrm{K}_{3,2}$	0.0	0.875	0.6	0.125	1.0	0.000	3.294
$\mathrm{K}_{1,4}$	0.2	0.500	0.2	0.500	1.0	0.000	2.726
$K_{4,1}$	0.0	0.938	1.0	0.000	1.0	0.000	4.965

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воронин В.В.* Продукционные правила для диагностических проверок // Информатика и системы управления. Благовещенск, 2003. №2(6). С.79-88.
2. *Воронин В.В.* Распределение вероятностей на множестве формальных дефектов // Известия вузов. Приборостроение. 2001. № 5. С.57–61.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.