

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ТЕСТОВ ДЛЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ МАТРИЦ

Программируемые логические матрицы (ПЛМ), которые относятся к большим интегральным схемам с матричной структурой [1, 2], представляют собой удобное средство для реализации дискретных устройств. По этой причине ПЛМ находят все более широкое применение при реализации различных устройств вычислительной техники [3]. Это, в свою очередь, делает актуальными вопросы тестового диагностирования ПЛМ, особенностью которого является то, что в этом случае нельзя ограничиваться рассмотрением дефектов, описываемых распространенной моделью константных неисправностей [4—6]. В [4—6] используется иная модель типичных дефектов ПЛМ, которая охватывает ошибки настройки ПЛМ на реализацию заданной системы булевых функций. Эта модель позволяет рассматривать дефекты, проявляющиеся как отсутствие соединений в некоторых точках матричного поля в конъюнктивной и дизъюнктивной частях ПЛМ (в исправной ПЛМ эти соединения есть), или, наоборот, как наличие соединений в некоторых точках матричного поля (в исправной ПЛМ этих соединений не должно быть). Здесь и далее используется терминология, принятая в [6]. Указанная модель может применяться не только для описания ошибок настройки, но и константных неисправностей на входных полюсах ПЛМ, на входных шинах после разветвления, на выходных полюсах ПЛМ, коротких замыканий между шинами и т. д. [5]. Таким образом, класс анализируемых неисправностей в ПЛМ значительно шире, чем класс константных неисправностей, что проявляется и количественно. Действительно, практика построения тестов для типовых элементов замены (ТЭЗ) на элементах малой и средней степени интеграции (серии 133, 155 и т. п.), содержащих 50—100 входных и выходных полюсов (в сумме) и 40—70 микросхем, в которых обычно рассматриваются одиночные константные неисправности на входных и выходных полюсах как устройства, так и микросхем, входящих в него, показывает, что таких неисправностей обычно 500—1000. В то же время в ПЛМ с параметрами $s=16$, $t=8$, $q=48$ (s — число входных полюсов; t — число выходных полюсов; q — число промежуточных шин) возможно $2s \cdot q + t \cdot q = 2 \cdot 16 \cdot 48 + 8 \cdot 48 = 1920$ одиночных неисправностей описанного выше типа в точках матричного поля.

Другой существенной особенностью ПЛМ является их регулярная структура, позволяющая использовать для описания структурных и функциональных свойств ПЛМ троичные и булевы матрицы, удобные для представления в памяти ЭВМ, и известные [7, 8] эффективные машинно-ориентированные алгоритмы выполнения различных преобразований над такими матрицами, которые возникают в процессе построения тестов для ПЛМ.

В настоящей работе приводятся результаты построения проверяющих тестов для ряда ПЛМ с помощью подсистемы построения тестов для ПЛМ [6], реализованной в виде комплекса программ, написанных на языке ФОРТРАН-IV для ЕС ЭВМ. Цель выполненных исследований состояла в выделении областей наиболее эффективного использования различных методов построения тестов, реализованных в подсистеме, а также в изучении свойств тестов ПЛМ (зависимость длины теста от используемого метода построения теста и числа неисправностей в ПЛМ).

В подсистеме построения тестов для ПЛМ реализованы следующие методы построения тестов.

Вероятностный метод (ВЕР1) основан на определении проверяющих возможностей входных наборов, построенных с помощью датчика псев-

дослучайных входных наборов, и включении в тест тех наборов, которые обнаруживают некоторые новые неисправности, т. е. неисправности, не обнаруживаемые совокупностью наборов, ранее включенных в тест. При этом дальнейшее применение метода считается неэффективным и осуществляется выход из программы, если очередная группа испытываемых входных наборов, состоящая из L наборов, обнаруживает меньше, чем P новых неисправностей. Параметры L и P определяются опытным путем и от их значений зависит полнота построенного теста и затраты времени на построение.

Вероятностный метод (ВЕР2) вычисления проверяющих наборов для неисправностей [9] основан на том, что процедура вычисления проверяющего набора для любой неисправности в ПЛМ состоит из двух частей. Первая заключается в однозначном определении значений некоторых входных переменных, а вторая — в доопределении частично определенного входного набора таким образом, чтобы он был ортогонален каждой конъюнкции из некоторого множества конъюнкций. При этом наиболее трудоемкой является вторая часть процедуры, где возможен перебор. В связи с этим предлагается при вычислении проверяющего набора для заданной неисправности выполнить первую часть процедуры, а затем доопределять полученный частично определенный входной набор случайным образом [9]. Для полученного полностью определенного входного набора вычисляется множество неисправностей, обнаруживаемых данным набором, но не обнаруживаемых ранее построенным тестом. Если это множество не пусто, то набор включается в тест. Далее производится проверка: обнаруживает ли построенный входной набор заданную неисправность? Если нет, то осуществляется попытка доопределить частично определенный входной набор другим способом и т. д. При этом процедура доопределения для каждой неисправности повторяется не более L_1 раз.

Регулярный метод построения проверяющего теста основан на последовательном вычислении проверяющих наборов для неисправностей. При этом, после того как найден проверяющий набор для некоторой неисправности, вычисляется множество неисправностей, которые обнаруживаются данным набором. Построенный входной набор включается в тест, обнаруживаемые им неисправности удаляются из исходного списка неисправностей и осуществляется переход к очередной оставшейся в списке неисправности и т. д.

В таблицах 1—3 приведены результаты построения проверяющих тестов для ряда ПЛМ с помощью регулярного и вероятностных методов ВЕР1 (при $L=20$, $P=1$) и ВЕР2 (при $L_1=3$). Эксперимент проводился на ЭВМ «ЕС-1033».

Анализ регулярного метода построения теста показывает, что его применение наиболее эффективно при построении проверяющих наборов для неисправностей на тех промежуточных шинах ПЛМ, которым соответствуют конъюнкции высокого ранга. Под рангом конъюнкции понимается число переменных, входящих в конъюнкцию. Пусть $r_i^1 = s - r_i$, где s — число входных полюсов в ПЛМ; r_i — ранг конъюнкции, реализованной на i -й промежуточной шине ПЛМ. Тогда максимальный перебор, который может возникнуть при построении проверяющих наборов с помощью регулярного метода для неисправностей на i -й промежуточной шине, равен $2^{r_i^1}$ (для неисправностей типа отсутствие соединения в конъюнктивной части и для обоих типов неисправностей в дизъюнктивной части) либо $2^{r_i^1 - 1}$ (для неисправностей типа наличие соединения в конъюнктивной части). Перебор вполне приемлем, если $r_i^1 \leq 8$, т. е. (при $s=16$) $r_i \geq 8$.

В то же время применение вероятностного метода ВЕР1 наименее эффективно при вычислении проверяющих наборов для неисправностей на тех промежуточных шинах ПЛМ, которым соответствуют конъюнк-

Таблица 1

Результаты построения тестов регулярным методом

№ пп.	Параметры ПЛМ			Средний ранг конъюнкций (если нет больших отклонений)	Число возможных неисправностей	Число необнаружимых неисправностей	Длина теста	Время построения
	s	q	t					
1	15	12	3	8	396	0	140	21"
2	16	48	8	6	1920	0	294	2'53"
3	16	48	8	8	1920	2	367	3'24"
4	16	48	8	11	1920	0	580	4'52"
5	16	48	8	13	1920	34	730	6'15"
6	20	50	9	6	2450	6	320	4'07"
7	20	50	9	13	2450	0	824	8'25"
8	20	50	9	—	2450	14	558	7'01"
9	21	90	19	—	5490	551	798	22'11"
10	23	60	10	13	3360	0	898	12'28"
11	23	60	10	—	3360	37	791	12'43"
12	23	60	10	18	3360	570	1870	25'02"

Таблица 2

Результаты построения тестов вероятностным методом ВЕР1

№ пп.	Параметры ПЛМ			Средний ранг конъюнкций (если нет больших отклонений)	Число возможных неисправностей	Число обнаружимых неисправностей	Число проверенных неисправностей	В процентах от числа обнаружимых неисправностей	Длина теста	Время построения
	s	q	t							
1	15	12	3	8	396	0	303	76,52	103	1'03"
2	16	48	8	6	1920	0	1806	94,06	248	4'55"
3	16	48	8	8	1920	2	1585	82,64	268	4'37"
4	16	48	8	11	1920	0	767	39,95	217	5'22"
5	20	50	9	6	2450	6	2366	96,81	265	6'26"
6	20	50	9	—	2450	14	1285	52,75	130	2'36"
7	21	90	19	—	5490	551	1694	34,30	167	10'51"
8	23	60	10	13	3360	0	614	18,27	134	5'11"
9	23	60	10	—	3360	37	1656	49,83	145	4'08"

ции высокого ранга. Действительно, для каждой из таких неисправностей существует сравнительно мало проверяющих наборов (не более 2^{r_i} или 2^{r_i-1}) и нахождение их случайным образом становится проблематичным. Если же ранг конъюнкций сравнительно небольшой (не более 5—8), то применение вероятностного метода ВЕР1 весьма эффективно. Сказанное хорошо подтверждается экспериментом (см. строки 2—4, 5—6, 8—9 табл. 2), когда с ростом среднего ранга конъюнкций, реализованных в ПЛМ, при одних и тех же параметрах L и P уменьшается число неисправностей, для которых удается построить проверяющие наборы, и растут затраты машинного времени. Рост затрат машинного времени связан с тем, что проверяющие возможности построенных входных наборов, включаемых в тест, с ростом среднего ранга реализуемых конъюнкций в общем случае снижаются (см. выше), а это приводит к необходимости для каждого очередного испытываемого входного набора

Результаты построения тестов вероятностным методом ВЕР 2

№ пп.	Параметры ПЛМ			Средний ранг конъюнкций (если нет больших отклонений)	Число возможных неисправностей	Число не обнаруженных неисправностей	Число проверенных неисправностей	Длина теста	Время построения
	s	q	t						
1	15	12	3	8	396	0	396	173	24"
2	16	48	8	6	1920	0	1919	479	4'43"
3	16	48	8	8	1920	2	1917	475	4'32"
4	16	48	8	11	1920	0	1920	708	5'37"
5	16	48	8	13	1920	34	1886	763	6'40"
6	20	50	9	6	2450	6	2444	663	8'15"
7	20	50	9	13	2450	0	2450	987	9'22"
8	20	50	9	—	2450	7	2443	766	9'08"
9	23	60	10	13	3360	0	3360	1281	16'30"
10	23	60	10	—	3360	37	3287	1211	18'16"

анализировать условия проверки данным набором большего числа еще не проверенных неисправностей.

Таким образом, регулярный и вероятностный методы ВЕР1 хорошо дополняют друг друга. Если в ПЛМ реализованы конъюнкции как низкого, так и высокого ранга, то вначале рекомендуется применять вероятностный метод ВЕР1, а когда его дальнейшее использование становится неэффективным, осуществляется переход к регулярному методу.

Обратим внимание на то, что с увеличением среднего ранга реализуемых конъюнкций при одних и тех же параметрах s , q и t растет длина построенного теста и возрастают затраты машинного времени на его построение (см. табл. 1, строки 2—5, 6—7, 10 и 12). Это объясняется тем, что, хотя затраты машинного времени на построение проверяющего набора для каждой отдельной неисправности с помощью регулярного метода и снижаются с ростом ранга реализуемых конъюнкций, число неисправностей, для которых необходимо отдельно строить проверяющие наборы, увеличивается. Это связано со снижением проверяющих возможностей входных наборов при росте среднего ранга реализуемых конъюнкций. По этой же причине происходит увеличение длины тестов, построенных с помощью вероятностных методов ВЕР1 и ВЕР2, с увеличением среднего ранга реализуемых конъюнкций (см. строки 2—3 в табл. 2 и строки 2—5, 6—7 в табл. 3).

Отметим также, что вероятностный метод ВЕР2 позволяет построить проверяющие тесты с высокой полнотой, сравнимой с полнотой тестов, построенных с помощью регулярного метода. Однако он уступает регулярному методу по затратам машинного времени, особенно с увеличением числа необнаружимых неисправностей, и качеству полученного теста: тесты, получаемые с помощью вероятного метода ВЕР2, длиннее (ср. аналогичные строки в табл. 1 и 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов С. И., Синев В. Н.— Зарубежная радиоэлектроника, 1979, № 1, с. 65.
2. Баранов С. И., Синев В. Н. Автоматы и программируемые матрицы.— Минск, 1980.
3. Баранов С. И., Баркалов А. А.— Зарубежная радиоэлектроника, 1982, № 6, с. 67.
4. Удалов В. И.— Автоматика и вычислительная техника, 1978, № 4, с. 22.
5. Ostapko D. L., Hong S. J.— IEEE Trans. Computers, 1979, v. C-28, № 9, p. 617.

6. Коротаев Н. А., Люльки А. Е. Автоматизация тестового диагностирования дискретных устройств.—Минск, 1983.
7. Закревский А. Д. Логический синтез каскадных схем.—М., 1981.
8. Закревский А. Д. Алгоритмы синтеза дискретных автоматов.—М., 1971.
9. Eichelberger E. B., Lindbloom E. L.—IBM J. Res. Developm., 1980, v. 24, № 1, p. 15.

Поступила в редакцию
28.12.83.

УДК 517.9

Б. С. КАЛИТИН

УСТОЙЧИВОСТЬ НЕИЗОЛИРОВАННОЙ ТОЧКИ ПОКОЯ

Пусть X — метрическое пространство, на котором заданы две динамические системы $\pi(x, t)$ и $\sigma(x, t)$ [1, 2]. Рассмотрим ситуацию, когда первая из этих систем получена из второй методом «замораживания» [1], а именно: пусть M — множество точек покоя системы π и $a \in M$. Предположим, что для некоторой окрестности U точки a и числа $T > 0$ имеют место следующие условия:

- 1) множество $\Pi = \sigma(M \cap U, [-T, T])$ является окрестностью точки a ;
- 2) $\forall x \in \Pi \cap M \quad \sigma(x, [-T, T]) \cap M = x$;
- 3) отрезки траекторий $\sigma(x, [-T, 0])$, $\sigma(x, [0, T])$ совпадают соответственно с полутраекториями

$$\pi(\sigma(x, T), R^{\pm}), \pi(\sigma(x, -T), R^{\pm})$$

системы π для всех $x \in \Pi \cap M$, причем знак «+», или «-» берется постоянным в каждой из областей

$$\Pi^{+} = \sigma(M \cap U, [0, T]), \text{ и } \Pi^{-} = \sigma(M \cap U, [-T, 0]).$$

Последнее в силу свойств точек покоя означает, в частности, что

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \pi(\sigma(x, -T), t) \in M, \text{ либо } \lim_{t \rightarrow -\infty} \pi(\sigma(x, -T), t) \in M \quad \text{сразу для}$$

всех начальных состояний $\sigma(x, -T) \in \Pi^{-}$.

Аналогичное свойство справедливо и для состояний $\sigma(x, T) \in \Pi^{+}$.

Поэтому естественным является следующее определение. Будем говорить, что направление движений динамических систем π и σ совпадает в Π^{+} (Π^{-}), если $\sigma(x, [0, T]) = \pi(\sigma(x, T), R^{+})$ (соответственно $\sigma(x, [-T, 0]) = \pi(\sigma(x, -T), R^{+})$), и противоположно, если вместо R^{+} берется R^{-} .

Теперь при выполнении условий 1)–3) нетрудно доказать следующее утверждение.

Лемма 1. 1⁰) Если направление движений динамических систем π и σ совпадает в Π^{-} и противоположно в Π^{+} , то точка покоя a динамической системы π устойчива по Ляпунову.

2⁰) Если направление движений противоположно в Π^{-} или совпадает в Π^{+} , то точка покоя a системы π неустойчива.

Рассмотрим пример использования леммы 1 при исследовании задачи устойчивости неизоллированной точки покоя. Пусть X — открытое подмножество R^n , $f: X \rightarrow R^n$ — непрерывная, а $\varphi: X \rightarrow R$ — непрерывно дифференцируемая функция. Предположим, что дифференциальные системы

$$\dot{x} = [\varphi(x)]^{\frac{p}{2q+1}} f(x), \quad x \in X, \quad (1)$$

и

$$\dot{y} = f(y), \quad y \in X, \quad (2)$$

где p и q — натуральные числа (возможно, $q=0$) обладают свойством существования и единственности решений. Кроме того, пусть $a \in X$ точка,