

Запорізький національний технічний університет



Радіоелектроніка Інформатика Управління

2(21)·2009

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

Видається з березня 1999 року

Зареєстрований **29 січня 2003 року**

Державним комітетом інформаційної політики,
телебачення та радіомовлення України.

Свідоцтво – серія **КВ № 6904**

Засновник і видавник – *Запорізький національний технічний університет*

Запоріжжя, ЗНТУ
2009

Постановами ВАК України №1-05/9 від 08.09.1999 р. та №3-05/7 від 30.06.2004 р. журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління» (скорочена назва – РІУ), який видається з 1999 року, включений до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук та фізико-математичних наук за спеціальністю «Радіофізика».

Журнал є донором журналу «Telecommunications and Radio Engineering», який видається в США.

Інтернет-сторінка журналу: <http://journal.zntu.edu.ua/ric/index.php?page=index>.

Статті, що публікуються в журналі, реферуються в базах даних та РЖ ВІНІТІ (Росія) і «Джерело» (Україна). Журнал РІУ міститься у міжнародній базі наукових видань Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/index.php>), електронна копія журналу розміщена на сайті Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського НАН України у розділі «Наукова періодика України» за адресою: <http://nbuv.gov.ua/portal/>.

Журнал розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22914).

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор – д-р техн. наук Піза Д. М.

Заст. головного редактора – канд. техн. наук Дубровін В. І.

Члени редколегії :

д-р фіз.-мат. наук Ахметшин А. М.
д-р техн. наук Волков О. В.
д-р фіз.-мат. наук Горбань О. М.
д-р фіз.-мат. наук Горр Г. В.
д-р техн. наук Гостев В. І.
д-р фіз.-мат. наук Дробахин О. О.
д-р техн. наук Карпуков Л. М.
д-р фіз.-мат. наук Корніч Г. В.

д-р фіз.-мат. наук Матюшин В. М.
д-р фіз.-мат. наук Онуфрієнко В. М.
д-р фіз.-мат. наук Погосов В. В.
д-р техн. наук Потапенко Є. М.
д-р техн. наук Толок В. О.
д-р техн. наук Труфанов І. Д.
д-р фіз.-мат. наук Чумаченко В. П.

Рекомендовано до видання вченою радою Запорізького національного технічного університету, протокол № 11 від 1.06.2009 р.

Рукописи проходять незалежне рецензування з залученням провідних фахівців, за результатами якого редакційна колегія приймає рішення про опублікування

Журнал зверстаний редакційно-видавничим відділом
Запорізького національного технічного університету

Адреса редакції: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ,
редакція журналу «РІУ»

Тел: (061) 769-82-96 – редакційно-видавничий відділ

Факс: (061) 764-21-41

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

ЗМІСТ

РАДІОФІЗИКА	5
<i>С. Г. Алексин, С. Г. Лебедев, О. О. Дробахин</i> ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГЕЛЬФАНДА – ЛЕВИТАНА – МАРЧЕНКО.....	5
<i>О. О. Дробахин, П. И. Заболотный, Е. Н. Привалов</i> РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА МИКРОВОЛНОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ В ВИДЕ СФЕРИЧЕСКОГО СЕКТОРА	11
<i>І. В. Зависляк, Г. П. Головач, М. О. Попов</i> МОДИФІКОВАНА ЕЛІПТИЧНА СИСТЕМА КООРДИНАТ ДЛЯ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧНОЇ ФІЗИКИ З СИМЕТРІЄЮ ЕЛІПТИЧНОГО ЦИЛІНДРА	16
<i>V. V. Pogosov, E. V. Vasyutin, A. V. Babich</i> FEATURE OF MAGIC METAL NANOCCLUSERS IN MOLECULAR TRANSISTOR	20
<i>Я. В. Чумаченко, В. П. Чумаченко</i> К ОБОСНОВАНИЮ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОДНОЙ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ ВОЛН ДЛЯ НАГРУЖЕННОГО ИЗЛОМА ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА.....	32
РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ	35
<i>А. Н. Буханько, В. М. Безрук, Е. В. Дуравкин</i> ПРИМЕНЕНИЕ Е-СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ УЧАСТКОМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ.....	35
<i>С. В. Морщавка, Д. М. Пиза, Е. Л. Белоусов</i> ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ПРОПАШНЫХ КУЛЬТУР. РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ	45
<i>О. М. Ибрагимов</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО РАДИОВЫСОТОМЕРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ.....	41
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	53
<i>О. О. Архипова, В. М. Журавльов</i> ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ БУКВ УКРАЇНСЬКОЇ МОВИ	53
<i>М. Г. Коляда</i> ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛОВ СЕТЕЙ С ОЧЕРЕДЯМИ ПАКЕТОВ ЗАЩИЩЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	70
<i>И. В. Гребенник, А. Ю. Хабаров, Ю. А. Гриценко, Д. В. Иванов</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ПУТИ СОЕДИНЕНИЯ ДВУХ ТОЧЕК ПРОВОДНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ ПРИ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДАННЫХ	57
<i>А. А. Лисняк, С. И. Гоменюк</i> ПРИМЕНЕНИЕ R-ФУНКЦИЙ ДЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ.....	76
<i>В. Н. Журавлёв, В. С. Кабак</i> ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО РЕЧЕСЛУХОВОГО ПРОЦЕССА	62
<i>М. Ю. Терновой</i> ПІДХІД ДО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ В ТЕРМІНАХ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	81
<i>Т. В. Кіпріч, В. М. Харитонов, В. І. Дубровін, А. В. Притула</i> ПОБУДОВА МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПОМПАЖНИХ ЯВИЩ У ГАЗОТУРБІННОМУ ДВИГУНІ.....	66
<i>А. С. Шкиль, Е. Е. Сыревич, Д. Е. Кучеренко, Самер Альмадхоун</i> МЕТОД ОБРАТНОГО ПРОСЛЕЖИВАНИЯ ДЛЯ ПОИСКА ОШИБОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ В HDL-КОДЕ	86

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ 91

Е. В. Бодянский, В. В. Волкова, К. В. Коваль
АВТОМАТИЧЕСКАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ
ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА
С ИСКУССТВЕННЫМ ОТБОРОМ91

О. О. Олійник, С. О. Субботін
ОПТИМІЗАЦІЯ НА ОСНОВІ КОЛЕКТИВНОГО
ІНТЕЛЕКТУ РОЮ ЧАСТОК З КЕРУВАННЯМ
ЗМІНОЮ ЇХНЬОЇ ШВИДКОСТІ.....96

С. Г. Удовенко, А. А. Шамраев, Г. Дибё
ЦИФРОВОЕ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
БЛОКАМИ ЛИНЕЙНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО
УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ 101

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ..... 107

В. П. Авраменко
СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ПО ЛИКВИДАЦИИ НЕШТАТНЫХ
СИТУАЦИЙ..... 107

А. Е. Архипов
ЭКСПЕРТНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ
ИНФОРМАЦИОННЫХ РИСКОВ И УРОВНЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ
ИНФОРМАЦИИ 111

В. М. Кришук, О. Ю. Малий, О. Ю. Воронай
УНІВЕРСАЛЬНА АЛГОРИТМІЧНА МОВА
ПРОГРАМУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ..... 115

В. В. Литвин
МУЛЬТИАГЕНТНІ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ, ЩО БАЗУЮТЬСЯ
НА ПРЕЦЕДЕНТАХ ТА ВИКОРИСТОВУЮТЬ
АДАПТИВНІ ОНТОЛОГІЇ 120

І. О. Романенко, В. Ф. Столбов, В. В. Калачова
ШЛЯХИ ОРГАНІЗАЦІЇ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ
В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦІЙНОГО
НАВЧАННЯ 127

С. Ю. Скрупский, К. Н. Касьян
ПРОГРАММНЫЕ МЕТОДЫ КОДИРОВАНИЯ
ВИДЕОПОТОКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ
В КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКЕ 130

ТЕОРІЯ І МЕТОДИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ 135

Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова
КОМПЕНСАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ
НЕЛИНЕЙНОГО ТРЕНИЯ
НА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ..... 135

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ..... 141

В. И. Гостев
ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА
С ВЫХОДНЫМИ СЖАТЫМИ, ЗАВИСЯЩИМИ
ОТ ОДНОГО ПАРАМЕТРА, S-ОБРАЗНОЙ
И Z-ОБРАЗНОЙ ФУНКЦИЯМИ
ПРИНАДЛЕЖНОСТИ..... 141

И. А. Орловский, Ю. С. Бут
УПРАВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМ
АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
МОСТОВОГО КРАНА ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
МОСТА БЕЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕБОРД
КОЛЕС С РЕЛЬСАМИ 144

АВТОРЫ НОМЕРА 152

1. При коректному формуванні таблиць прив'язки та зв'язків можна обійти недоліки, які були зроблені при проектуванні бази даних;

2. Даний підхід гарантує вірність побудови складних запитів та підвищує оперативність отримання необхідної інформації;

3. Виключає необхідність для користувача володіння спеціальними інформаційно-технічними знаннями та дозволяє зосередитись на вирішенні задач управління.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гольшев А. К. Сложные системы с развитой функцией информационно-аналитической поддержки управления. Элементы теории, методологии, практики / А. К. Гольшев. – К. : 2001. – 253 с.
2. Коннолли Т. Базы данных: проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика / Т. Коннолли, К. Бегг, А. Страчан. – М. : «Вильямс», 2000. – 1120 с.
3. Microsoft SQL Server 2008 [Електронний ресурс]. Електрон. текстові дані. – Режим доступу: www.microsoft.com/SQL/default.aspx. – Wednesday, 15 April, 2009.
4. Microsoft Office Access 2007 [Електронний ресурс]. Електрон. текстові дані. – Режим доступу: <http://office.microsoft.com/ru-ru/access/default.aspx>. – Wednesday, 15 April, 2009.
5. Праг К. Н. Microsoft Access 2000. Библия пользователя / К. Н. Праг, М. Р. Ирвин. – М. : Диалектика, 2001. – 1039 с.
6. 1С: Предприятие [Електронний ресурс]. Електрон. текстові дані. – Режим доступу: <http://www.1c.ru/>. – Wednesday, 15 April, 2009.
7. Microsoft SQL Server 2008: Reporting Services [Електронний ресурс]. Електрон. текстові дані. – Режим доступу: <http://www.microsoft.com/sqlserver/2008/en/us/reporting.aspx>. – Wednesday, 15 April, 2009.
8. SAP BusinessObjects. Crystal Reports [Електронний ресурс]. Електрон. текстові дані. – Режим доступу: <http://www.sap.com/solutions/sapbusinessobjects/sme/reporting/crystalreports/index.epx>. – Wednesday, 15 April, 2009.
9. The VSReport Designer. [Електронний ресурс]. Електрон. текстові дані. – Режим доступу: http://help.globalscape.com/help/eft5/arm/the_vsreport_designer.htm. – Wednesday, 15 April, 2009.
10. Flexible reporting to leverage your Business Intelligence capabilities [Електронний ресурс]. Електрон. текстові дані. – Режим доступу: <http://www.perpetuumsoft.com/Product.aspx?lang=en&pid=21>. – Wednesday, 15 April, 2009.
11. Касьянов В. Н. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение / В. Н. Касьянов, В. А. Евстигнеев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 1104 с.
12. Андерсон Дж. А. Дискретная математика и комбинаторика: Пер. с англ. / Дж. А. Андерсон – М. : Вильямс, 2003. – 960 с.

Надійшла 23.02.2009
Після доробки 11.05.2009

Предложен подход к получению информации из базы данных и ее представлению в терминах предметной области. В состав этого подхода входят метод привязки к предметной области и метод построения запроса к базе данных в терминах предметной области.

The approach to information obtaining from database and its representation in the terms of data domain was proposed. This approach is represented by the method of data domain binding and the method of query construction in data domain terms.

УДК 681.326

А. С. Шкиль, Е. Е. Сыревич, Д. Е. Кучеренко, Самер Альмадхоун

МЕТОД ОБРАТНОГО ПРОСЛЕЖИВАНИЯ ДЛЯ ПОИСКА ОШИБОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ В HDL-КОДЕ

В данной статье были рассмотрены методы поиска ошибок проектирования в неструктурированном HDL-коде. Разработан метод обратного прослеживания. Проведен эксперимент над HDL-моделью цифрового устройства с использованием данного метода.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Верификация цифровых проектов, то есть аппаратных или встроенных аппаратно-программных систем, описанных на языке описания аппаратуры (Hardware Description Language – HDL), является важной задачей в процессе проектирования цифровых устройств. Часто более 70 % времени разработки затрачивается на поиск и исправление ошибок в проекте. Целью данной работы является разработка методов поиска дефектов/ошибок проектирования в

неструктурированном HDL-коде, позволяющих сократить время проведения диагностического эксперимента и уменьшить длину диагноза. Исходя из вышесказанного, необходимо решить задачу адаптации метода обратного прослеживания при верификации HDL-модели и провести диагностический эксперимент по поиску ошибок проектирования в рамках верификации [1].

2 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ ПРИМЕНительно К МОДЕЛЯМ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

В данной работе аналогично понятию дефект используется понятие ошибки проектирования. Диагно-

© Шкиль А. С., Сыревич Е. Е., Кучеренко Д. Е., Самер Альмадхоун, 2009

стический эксперимент (ДЭ) над HDL-кодом осуществляется в два этапа [2]. На первом этапе проводится безусловный эксперимент. Если результат хотя бы на одном внешнем выходе не совпадает с эталоном, выполняется второй этап ДЭ. Проблема диагностирования технического состояния модели цифрового устройства заключается в минимизации области существования ошибок проектирования относительно наперед заданного класса, которая называется множеством эквивалентных дефектов, при допустимых параметрах длины теста и числа наблюдаемых выходов. Чем больше длина теста и количество наблюдаемых выходов, тем выше разрешающая способность алгоритма диагностирования, которая должна обеспечивать определение неисправного элемента только по фактическим реакциям без доступа к контрольным точкам (КТ). При фиксации параметров длины теста и числа наблюдаемых выходов, что имеет место в алгоритмах поиска дефектов, основанных на анализе таблиц неисправностей, можно повысить глубину диагностирования путем использования структуры связей входов-выходных элементов (операндов или операторов) модели цифрового устройства. Максимально адекватной реакцией модели на тест-вектор при наличии дефекта является вектор-строка значений наблюдаемых элементов модели. В качестве примера можно выделить метод тестового диагностирования ошибок проектирования в модели ЦУ на основе использования многозначных таблиц неисправностей (МТН) и анализе структуры объекта.

В начальную область подозреваемых ошибок проектирования входят все функциональные элементы (ФЭ) либо операндовые вершины. ДЭ проводится исходя из предположения, что в коде имеется единичная ошибка проектирования, результирующая в неисправное значение на некоторой операндовой вершине, которая является либо контрольной точкой, либо внешним выходом. Основной принцип, лежащий в основе структурных методов поиска ошибок проектирования, следующий. Если в очередной контрольной точке результат элементарной проверки отрицателен, то в область подозреваемых ошибок на очередном шаге алгоритма входят сам ФЭ и все его предшественники. Если результат проверки положителен, то все предшественники предполагаются исправными, а подозреваемая ошибка произошла среди остальных ФЭ области подозреваемых ошибок пре-

дыдущего шага алгоритма. Если транспортирование ошибки проектирования на внешний выход невозможно, то граф необходимо разбить на подграфы по принципу существования активизации. Причиной невозможности активизации может быть либо так построенный код в силу ряда причин, либо в коде имеется ошибка (предполагаемое место ошибки – подграф его предшественников).

Стандартные проверяющие тесты неадекватны по нескольким причинам [3]. Основной из них является то, что в основе построения проверяющих тестов лежат понятия транспортирования и активизации пути, по которому неисправность транспортируется на внешний выход схемы. А это не всегда представляется возможным сделать, так как в HDL-коде функциональные неисправности могут быть замаскированы дальнейшими вычислениями таким образом, что ошибка не будет наблюдаться на внешнем выходе. Например, ошибка на выходе любого функционального элемента не транспортируется на внешний выход, если среди его преемников есть оператор логического ИЛИ с константной 1 на одном из входов. Для декомпозиции исходного графа используются контрольные точки (аналогично контрольным точкам при генерации тестов, которые позволяли «разбить» путь активизации и определить границы подграфов). Данные контрольные точки будут выходами каждого из подграфов. Таким образом, ошибка проектирования транспортируется на внешний выход каждого подграфа. Существуют два типа контрольных точек, используемых при поиске места ошибки. Контрольные точки первого рода – сигнал (переменная) модели, эталонные значения которых известны из спецификации. Контрольные точки второго рода – сигнал (переменная) модели, значения которых наблюдаемы, но до начала эксперимента неизвестны. Структуризация исходной модели на HDL выполняется путем выделения многовыходового подграфа, который порождается (активизируется) в результате подачи на модели ЦУ специализированного теста. Входами подграфа являются внешние входы (операндовые вершины, не только физические), а выходами – КТ первого рода. По результатам проведения первого этапа диагностического эксперимента (подачи теста для определения наличия ошибки проектирования в описании) формируется вектор результатов экспериментальной проверки, который фиксирует равенство эталонной и

```
Entity SCH is Port (X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7, X8: in bit; O15: out bit); End;  
Architecture BEH of SCH is signal S9, S10, S11, s12, s13, S14: bit; begin  
  S9<=X1 and x2; S10<=X3 and x4; S11<=X5 and x6; S12<=X7 and X8;  
  S13<=S9 and S10; S14<= S11 and S12; O15<=S13 nand S14; End;
```

Рисунок 1 – Пример HDL-модели цифрового устройства

экспериментальной реакции. Другими словами, определяется, на какие из множества выходов оказывает влияние ошибка проектирования.

3 МЕТОД ОБРАТНОГО ПРОСЛЕЖИВАНИЯ

В спецификациях HDL-моделей реальных цифровых устройств КТ первого рода, в которых известны значения эталонных сигналов до начала написания кода, как правило, достаточно немного. Поэтому локализация до подграфа с выходной КТ первого рода является недостаточной. Желательно локализацию ошибочных операторов проводить до КТ второго рода, но эталонов нет и взять их негде. Выходом из этого противоречия является применение в подграфе, где выходом является КТ первого рода, метода обратного прослеживания, который первоначально был ориентирован поиск константных неисправностей в цифровых схемах в условиях отсутствия эталонов во внутренних точках. Классический метод обратного прослеживания, который схемотехники иногда называли методом «доискивания», основывался на следующих положениях: есть устройства с доступными внутренними линиями и его структурно-функциональная модель; есть условие существенности для каждого элемента; есть тест, который активизирует пути в модели; есть эталонные реакции на внешнем выходе модели [4].

Для использования этого метода при «доискивании» в классе эквивалентных ошибок при диагностике HDL-кода, необходима модификация метода. Принимаются следующие положения:

1. Класс неисправности – замена функционального элемента;
2. В качестве тестов используются различающая последовательность (РПС) для каждого ФЭ;
3. Неисправным (ошибочным) признается ФЭ, на входах которого наблюдалось последнее несовпадение с эталоном.

Алгоритм выполнения «доискивания»:

1. Выполняется моделирование тестов на реальной модели до внешнего выхода (КТ);
2. Если на выходе обнаружено несовпадение с эталоном, то выполняется обратное прослеживание;
3. Обратное прослеживание идет до тех пор, пока результат не равен $\emptyset$, путем пересечения текущего вектора с условиями существенности функционального элемента;
4. Из непустых пересечений формируется подмножество подозреваемых элементов.

Пусть имеется некоторый ошибочный HDL-код (рис. 1), реализующий схему, представленную на рис. 2. Ошибка в коде: в операторе S12 функция **or** заменена на **and**.

Для этого фрагмента кода построен тест 11011100 и эталонное значение 0 на внешнем выходе (сигнал O15). В результате подачи теста на HDL-модель на ее выходе получена 1, что не совпадает с эталоном. Выполним обратное прослеживание, отмечая его результаты для наглядности на фрагменте цифровой схемы (рис. 2), эквивалентной приведенному коду.

Наиболее эффективной формой для реализации обратной импликации является кубическая форма представления моделей примитивов, поэтому для наглядности рассмотрим применение метода «доискивания» в кубической форме. Если рассматривать условие существенности в кубической форме, то они подобны D-покрытиям, но не учитывают направление перехода (инверсию). Покрытия существенности для элементов (операторов) AND и OR приведены на рис. 3.

Процедура выполнения алгоритма обратного прослеживания для фрагмента HDL-кода с предопределенными операторами параллельного назначения сигналов (ПНС) подобна процедуре обратной импликации для комбинационной схемы, при условии, что в качестве примитивных элементов выступают покрытия существенности соответствующих ПНС. Первоначально выполняется моделирование теста на реальном (неисправном) коде и результат моделирования записывается в первую строку [5]. Результат из спецификации не совпадает с эталоном, поэтому выполняется обратное прослеживание путем пересечения

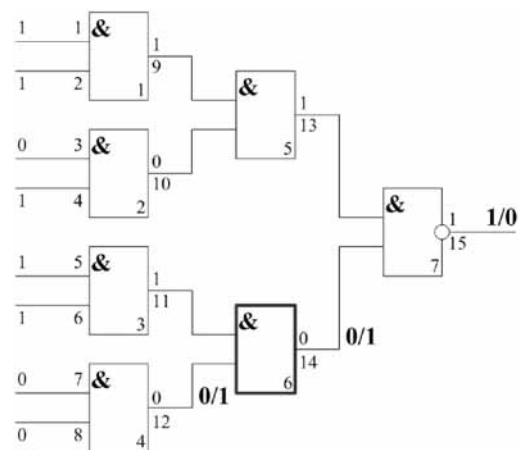


Рисунок 2 – «Доискивание» на примере структурно-функциональной схемы

X1	X2	X3	Y	X1	X2	X3	Y
Z	1	1	Z	Z	0	0	Z
1	Z	1	Z	0	Z	0	Z
1	1	Z	Z	0	0	Z	Z

Рисунок 3 – Покрытия существенности элементов AND и OR

$$C = X1 \cdot X2 \vee X3 \cdot X4$$

X1	X2	X3	X4	C
0	X	0	X	0
0	X	X	0	0
X	0	0	X	0
X	0	X	0	0
1	1	X	X	1
X	X	1	1	1

Рисунок 4 – Решение равенства по логическому условию

X1	X2	X3	X4	D1	D2	Y
0	X	0	X	X	Z	Z
0	X	X	0	X	Z	Z
X	0	0	X	X	Z	Z
X	0	X	0	X	Z	Z
1	1	X	X	Z	X	Z
X	X	1	1	Z	X	Z

Рисунок 5 – Покрытие существенности оператора IF()

полученного вектора с покрытиями существенности элементов модели. Пересечения выполняются до тех пор, пока результат не будет равен $\emptyset$. Процедура выполнения обратного прослеживания приведена в табл. 1.

Таким образом, неисправным является элемент, у которого входом является линия 12, т. е. элемент 6, который был ИЛИ, а стал И, что и требовалось доказать. Каждый специализированный тест порождает многовыходной подграф, входами которого являются внешние входы (либо КТ первого рода), а выходами внешними выходами (либо КТ первого рода). Кроме операторов ПНС в HDL-коде присутствуют последовательные операторы. Особый интерес при выполнении обратного прослеживания представляют условные операторы (*IF*, *CASE*), т. к. они находятся на стыке данных и управления. Рассмотрим оператор

IF: IF ((x1 and x2) or (x3 and x4)) THEN y<=d1 ELSE y<=d2. Оператор *IF()*, реализующий двухвыходовую условную вершину, состоит из логического условия *C* и двух выполняемых операторов ПНС или присваивания значений переменных. Логическое условие *C* в операторе *IF (C)* – это уравнение, решение в кубической форме представлено на рис. 4.

Таким образом, оператор *IF()* может быть представлен моделью мультиплексора с двумя информационными входами, группой управляющих входов и одним (двумя) выходами (два выхода будет в случае, если назначение выполняется для разных сигналов). Покрытие существенности оператора *IF()* представлено на рис. 5.

Кроме оператора *IF()* к условным операторам можно отнести и оператор *CASE()*, который реализует многовыходовую условную вершину. Фрагмент HDL-кода с оператором *CASE()* представлен на рис. 6.

Модель оператора *CASE()* в форме мультиплексора и его покрытие существенности представлено на рис. 7.

К операторам ПНС относятся также арифметические операторы, выполняемые, как правило, над многоразрядными операторами. Если рассмотреть операцию сложения одноразрядных операндов $S = A + B$, то схемной реализацией ее является одноразрядный двухвходовой сумматор. Его закон функционирования и фрагмент покрытия существенности приведен на рис. 8. Следует отметить, что покрытие существенности строится динамически на основании закона функционирования сумматора. Имея покрытия существенности для одноразрядного сумматора с учетом процедур обратной импликации через арифметические операнды, легко строятся процедуры обратного продвижения существенности через многоразрядные арифметические операции. Отметим, что для арифметических операций корректными могут быть только одномерные по входам покрытия существенности.

Таблица 1 – Процедура обратного прослеживания

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	результат из спецификации 0 линия 15 сущ.
													z	z	$\cap \neq \emptyset$
												1	z	z	$\rightarrow \emptyset$
												z	1	z	
1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	z	z	линия 14 сущ.
											z	1		z	$\rightarrow \emptyset$
										1	z		z		$\cap \neq \emptyset$
1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	z	1	z	z	линия 12 сущ.
						z	1				z				$\rightarrow \emptyset$
							1	z			z				$\rightarrow \emptyset$


```

variable xxx : in std_logic_vector(2 downto 0);
case xxx is
  when «000»=> Y<=D1;
  when «010»=> Y<=D3;
  when «100»=> Y<=D5;
  when «110»=> Y<=D7;
  when «001»=> Y<=D2;
  when «011»=> Y<=D4;
  when «101»=> Y<=D6;
  when «111»=> Y<=D8;
end case;

```

Рисунок 6 – Фрагмент HDL-кода с оператором CASE()

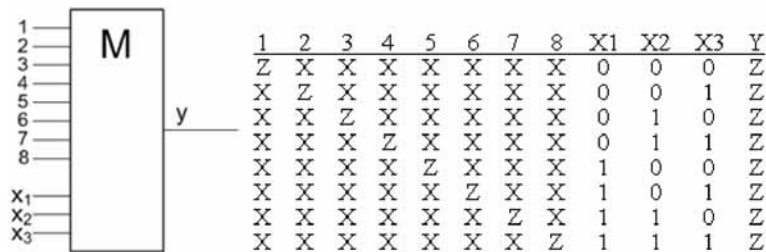


Рисунок 7 – Модель CASE() в форме мультиплексора и его покрытие существенности

A_i	B_i	C_{i-1}	S	C_i	A_i	B_i	C_{i-1}	S	C_i
0	0	0	0	0	Z	0	0	Z	0
0	1	0	1	0	0	Z	0	Z	0
1	0	0	1	0	0	0	Z	Z	0
1	1	0	0	1	Z	1	1	Z	1
0	0	1	1	0	1	Z	1	Z	1
0	1	1	0	1	1	1	Z	Z	1
1	0	1	0	1	Z	0	1	Z	Z
1	1	1	1	1	0	Z	1	Z	Z

Рисунок 8 – Закон функционирования и фрагмент покрытия существенности одноразрядного сумматора

В качестве примера рассмотрим операцию сложения двух четырехразрядных операторов $S(4) = A(4) + B(4)$ на примере $A = 5$, $B = 6$, $S = 5 + 6 = 11$. В двоичном виде $S = A + B = 0101 + 0110 = 1011$. Если $S = 10Z1$ (символ существенности находится в третьем выходном разряде), то существует только одно корректное решение при $A = 0101$ и $B = 01Z0$. В качестве проверки рассмотрим $S = A + B = 0101 + 01Z0 = 10Z1$, при условии, что $Z = \{0, 1\}$. Приведенный пример подтверждает возможность выполнения обратной импликации символа Z через многоразрядные арифметические операторы. Таким образом, имея покрытия существенности для операторов ПНС и условных операторов можно выполнять обратное прослеживание для любых фрагментов HDL-кода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы поиска дефектов (ошибок проектирования) для верификации HDL-моделей позволяют не

только говорить о наличии ошибки проектирования, но и точно определить место ее возникновения (локализовать дефект). В работе были усовершенствован метод обратного прослеживания, который применим для «доискивания» в подграфах, не имеющих внутри себя контрольных точек первого рода.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Сыревич Е. Е. Верификация моделей цифровых устройств, представленных на языках описания аппаратуры: дисс. канд. техн. наук: 05.13.12 / Сыревич Евгения Ефимовна. – Харьков, 2007. – 176 с. – Библиогр.: с. 82–130.
2. Структурный метод поиска ошибок проектирования в моделях радиоэлектронных устройств на HDL: тез. докл. Третьего Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (октябрь, 2008) / отв. ред. Бондаренко. – Харьков : 2008. – 48–51 с.
3. Шкиль А. С. Реализация процедур импликации на графовой структуре / Шкиль А. С., Чегликов Д. И., Зинченко Д. Е. // Журн. радиоэлектронные компьютерные системы. – 2006. – Вып. 6. – С. 172–177.
4. Abramovici M. Digital System Testing and Testable Design / Abramovici M., Breuer M., Friedman A. – New York : Computer Science Press, 1998. – 652 p.
5. Test Generation for VHDL Descriptions Verification: Proceedings of IEEE East-West Design & Test Workshop (September, 2005). – Odessa : 2008. – Pp. 191–195 p.

Надійшла 16.03.2009
Після доробки 18.05.2009

У даній статті були розглянуті методи пошуку помилок проектування в неструктурованому HDL-коді. Був розроблений метод зворотнього простежування. Був проведений експеримент над HDL-моделлю цифрового пристрою з використанням даного методу.

In this paper the method of design error searching in unstructured HDL-code was considered. The backtracing method was developed. An experiment on HDL-model of digital device that uses this method was carried out.