

УДК 004.3,004.4,004.052.32

Зинченко Юрий Евгеньевич, Зинченко Татьяна Анатольевна

**АДАПТИВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ТЕСТОВ
ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ РЭА И ЭВА**

В докладе представляется новый подход адаптивного псевдослучайного тестирования цифровых устройств РЭА и ЭВА и реализация подхода в

системе AGAT, разработанной в лаборатории «FPGA-технологии проектирования и диагностика компьютерных систем» ДонНТУ. Описывается назначение, функциональные возможности, структура программного обеспечения и ключевые возможности системы. Приводятся результаты экспериментальных исследований системы.

Zinchenko Yuri Evgenievich, Zinchenko Tatyana Anatolyevna

ADAPTIVE GENERATION OF PSEUDO-RANDOM TESTS DIGITAL DEVICES REA AND EVA

The report presents a new approach to adaptive pseudo-random testing of digital devices REA and EVA and the implementation of the approach in the AGAT system, developed in the laboratory "FPGA technologies for design and diagnostics of computer systems" of Donetsk National Technical University. The purpose, functionality, structure of the software and key capabilities of the system are described. The results of experimental research of the system are presented.

Введение

Автоматическая генерация и синтез тестов цифровых устройств (ЦУ) компьютерных систем (КС), в том числе радиоэлектронной (РЭА) и электронно-вычислительной (ЭВА) аппаратуры, как известно, являются классическими задачами, которые возникли одновременно с рождением вычислительной техники. Однако, несмотря на это они до сих пор успешно не решены. Существующие на мировом рынке и стран СНГ системы автоматического построения тестов обеспечивают покрытие (обнаружение) в среднем всего лишь 50-60% неисправностей, что является далеко недостаточно. Поэтому компании, занимающиеся разработкой диагностического обеспечения, вынуждены строить или дорабатывать тесты вручную, что сопряжено с высочайшей трудоемкостью и требуют высокой квалификации инженеров-диагностов [1,2].

Таким образом разработка эффективных систем генерации тестов по-прежнему является актуальной задачей.

Одним из подходов построения тестов ЦУ, на котором базируется предлагаемая система, является вероятностное или случайное тестирование ЦУ, которое сводится к генерированию случайных или псевдослучайных тестов. Подход позволяет достаточно просто строить тесты и не нуждается в сложных алгоритмах анализа структуры или функций объекта ди-

агностики (ОД), свойственных детерминированному синтезу тестов. Однако существенным недостатком данного подхода является низкая полнота построенного теста (соотношение числа обнаруженных неисправностей к общему числу неисправностей ОД), обычно не превышающая 50%. При детерминированном синтезе тестов принципиально можно получить 100-процентную полноту, однако этот подход сопряжен с высочайшей трудоемкостью [3,4].

Поэтому для построения системы тестирования ЦУ в данной работе был разработан и внедрен усовершенствованный так называемый поход адаптивного псевдослучайного тестирования (АПСТ), обеспечивающий повышение полноты теста, сохраняя при этом главное достоинство вероятностного подхода – простоту реализации [5-8].

Сущность АПСТ [7] состоит в следующем.

В процессе генерации теста ОД вначале строятся тесты по принципу классической псевдослучайной генерации на основе линейных псевдослучайных тестов. Если при этом удастся достичь требуемой полноты теста, процесс генерации теста прекращается. В противном случае запускается псевдослучайная генерация на основе нелинейных псевдослучайных тестов. В случае же, когда и на нелинейных тестах требуемой полноты теста достичь не удастся, запускается АПСТ, состоящая из двух основных этапов:

- на первом этапе выполняется процесс «*распознавания ОД*», когда на основе моделирования ОД строится его *RTL-модель*, представляемая в виде так называемого *альтернативного графа (АГ)*, состоящего их вершин (регистров -состояний) и «помеченных» логическими условиями переходов между состояниями;

- далее активируется процесс «*блуждания по АГ*»: активизация состояний и переходов графа и поиск тестовых векторов для новых (ранее обнаруженных) неисправностей ОД, которые добавляются к ранее построенному тесту.

Наряду с АПСТ для повышения полноты теста может использоваться параллельное тестирование одного или группы ОД в локальной компьютерной сети (ЛКС), а также «многопоточная» реализация процессов генерации теста и моделирования неисправностей на основе использования многоядерных процессоров персональных компьютеров (ПК), образующих локальную сеть. «Многопоточность» позволяет задействовать многоядерные процессоры, как автономных ПК, так и ПК, работающих в ЛКС. Это

также обеспечивает «суммирование» АГ ОД, как для одного «тяжелого» объекта, так и для группы ОД, моделируемых в локальной сети, реализуя при этом в динамике процессы распознавания ОД и блуждания по АГ непрерывно.

Новый подход АПСТ реализован в САПР-Т «Генератор АГАТ» (*Automatic Generator of Adaptive Test*), который предназначен для построения и анализа тестов ЦУ РЭА и ЭВА.

В качестве ОД Генератора АГАТ выступают цифровые типовые элементы замены (ТЭЗ), построенные на интегральных микросхемах (ИМС) малой и средней степени интеграции. ТЭЗ представляются принципиальной схемой в EDIF-формате и PSpice-моделями компонент, построенных в САПР ORCAD [9]. В качестве моделей неисправностей при генерации и анализе тестов используется модель одиночной константной неисправности (КН) [1,2].

АГАТ представляет собой интеграцию комплекса собственного программного обеспечения (ПО) и САПР ORCAD.

В процессе построения тестов и моделирования неисправностей генератор АГАТ обеспечивает реализацию следующих **основных функций**:

- генерацию линейных, нелинейных и адаптивных псевдослучайных тестов, ручное задание тестов;
- анализ полноты теста, измерение активности внешних и внутренних контрольных точек (КТ) ОД на основе логического моделирования;
- анализ стабильности и критических состояний теста на основе PSpice-моделирования с реальными задержками ИМС;
- устранение «холостых» векторов и построение псевдослучайного теста, соизмеримого по длине с детерминированным тестом;
- автоматическое построение баз данных тестов и тестовых реакций для внешних и внутренних КТ ОД на основе Pspice-моделирования ОД на реальных задержках ИМС;
- отображение результатов генерации и анализа тестов непосредственно на принципиальной схеме ОД в графическом редакторе САПР ORCAD;
- поиск неисправностей ОД с точностью до съемной компоненты на основе сочетания алгоритмов обратного прохода и «галопирования»;
- гибкую форму задания ОД и ИМС, поддержку EDIF- и PSpice-форматов, широкую номенклатура ИМС с возможностью расширения библиотек компонент ОД;

- построение базы данных тестов и тестовых реакций ОД на основе моделирования с реальными задержками ИМС;
- отображение состояния схемы в OrCAD Capture – позволяет непосредственно в схемном редакторе OrCAD отображать обнаруженные и не обнаруженные тестом КН на логических элементах схемы ОД, а также информацию об активности входов и выходов элементов;
- сбор статистики о ходе генерации – создание файла статистики о ходе генерации в формате HTML, который включает информацию о состояниях схемы и переходах между ними, количестве обнаруженных неисправностей в каждом из состояний и прочее;
- структура программного обеспечения генератора AGAT, которая реализует описанные функции, приведена на рис. 1. На рис. 2 приведено главное окно генератора AGAT.

Экспериментальные исследования АПСТ в составе AGAT проводились для набора из 400 цифровых ТЭЗ специализированного радиотехнического комплекса (СРТК), которые по своей структуре и сложности аналогичны схемам набора ISCAS'89 [10], на которых диагносты обычно проводят испытания своих разработок. Исследования проводились как для традиционного, так и адаптивного ПСТ ТЭЗ по широкому спектру параметров (полноте, времени генерации теста и т.д.). Отдельные результаты испытаний для группы из 15 ТЭЗ СРТК представлены в таблице 2, где приведена оценка полноты традиционного и адаптивного ПСТ. Из таблицы видно, что практически во всех случаях адаптивный подход построения теста дает прибавку полноты теста в пределах 10-30% [11].

Экспериментальные исследования группы из 400 ТЭЗ СРТК показали следующие основные результаты:

- использование адаптивного ПСТ в локальной компьютерной сети на 10-ти традиционное ПСТ обеспечило диагностический стандарт полноты теста (80%) примерно для 40% ТЭЗ за приемлемое время (не более 30 мин/ТЭЗ);
- 2-х ядерных ПК позволило повысить число успешно протестированных ТЭЗ до 80%. При этом время тестирования не превышало 5 мин;
- для остальных «тяжелых» 20% ТЭЗ тесты, сгенерированные AGAT, достраивались до 80% полноты вручную.

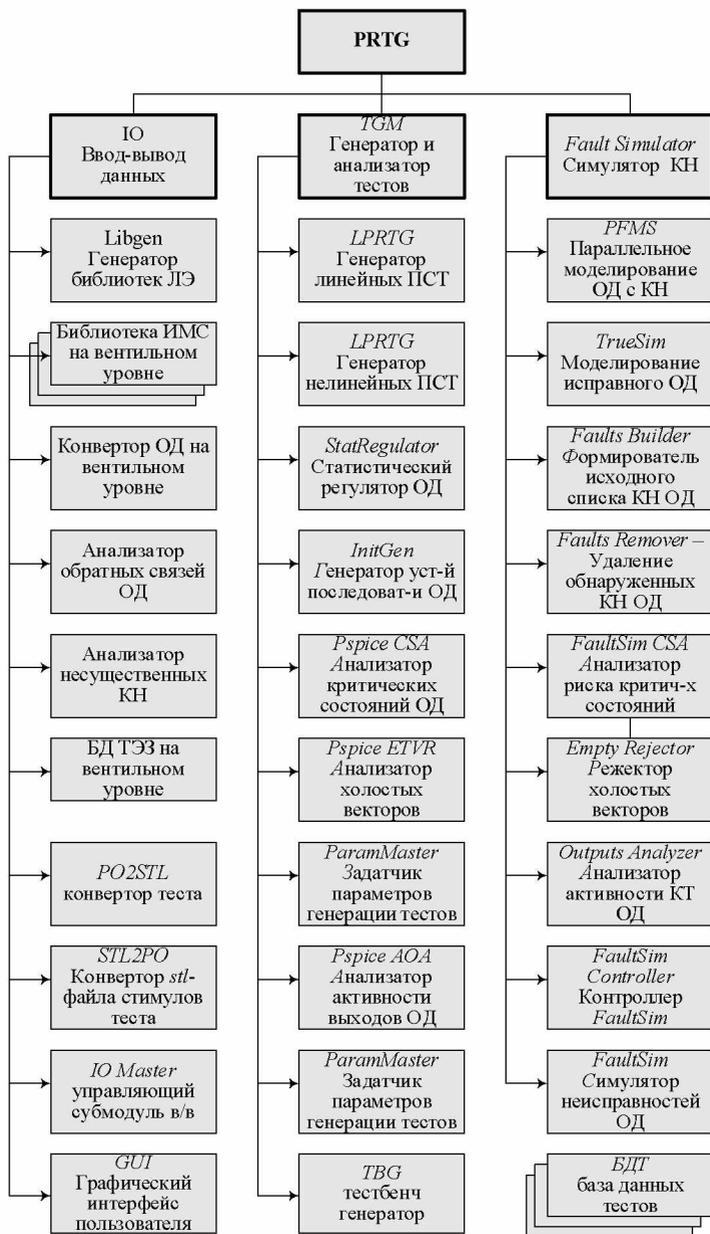


Рис. 1. Структура программного обеспечения генератора AGAT

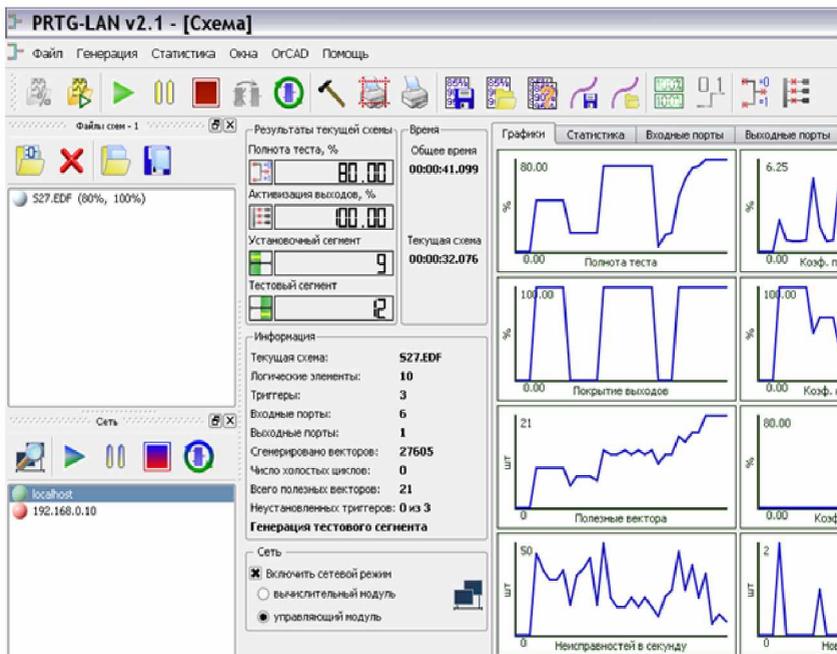


Рис. 2. Главное окно генератора AGAT

Таблица 2

Сравнительные результаты традиционного (Т) и адаптивного (А) ПСТ цифровых ТЭЗ СРТК

ТЭЗ	Триггеры/ ЛЭ	Полнота теста		Длина теста	
		А	Т	А	Т
1	25 / 355	59%	54%	50	45
2	72 / 503	73%	43%	162	143
3	9 / 307	91%	43%	55	17
4	16 / 796	82%	34%	83	74
5	17 / 206	95%	65%	105	95
6	13 / 267	71%	55%	50	45
7	48 / 238	75%	56%	69	49
8	14 / 63	70%	45%	28	12

9	27 / 190	79%	74%	55	48
10	40 / 386	57%	48%	33	31
11	19 / 142	81%	54%	95	45
12	36 / 255	78%	65%	81	84
13	40 / 504	79%	68%	82	61
14	32 / 650	83%	85%	68	65
15	14 / 601	53%	43%	26	13

Выводы

В статье предложена действующая система автоматической генерации тестов ЦУ РЭА и ЭВА, в которой заложен как традиционный подход, так и предложены инновационные подходы адаптивного ПСТ как на отдельном ПК, так и в локальной компьютерной сети для одного и для группы ТЭЗ. Эффективность AGAT подтверждается результатами экспериментальных исследований. Практическая значимость подхода заключается в сокращении вычислительных затрат на генерацию теста и повышении полноты теста на 10-30%. Таким образом, эксперимент подтвердил эффективность адаптивного подхода ПСТ в сочетании с использованием локальной компьютерной сети и многоядерных ПК для последовательных ЦУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Bushnell, M. L.* Essentials of electronic testing for digital, memory and mixed-signal VLSI circuits / M. L. Bushnell, V. D. Agrawal. – Kluwer academic publishers, 2001. – 690 p.
2. *Сперанский, Д. В.* Моделирование, тестирование и диагностика цифровых устройств: учебное пособие 3-е изд. / Д. В. Сперанский, Ю. А. Скобцов. — Москва: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 529 с. // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: URL: <http://www.iprbookshop.ru/94854.html> (дата обращения: 30.12.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.
3. *Rene, David.* Random testing of digital circuits. – CRC Press, 1998. – 496 p.
4. *Ярмолик В. Н.* Генерирование и применение псевдослучайных сигналов в системах испытаний и контроля / В. Н. Ярмолик, С. Н. Демиденко. - Минск, 1986.
5. FPGA-технологии проектирования и диагностика компьютерных систем /Зинченко Ю.Е., Калашников В.И., Хайдук С., Зинченко Т.А. и др. // Сбор-

ник научных трудов VI Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование». – Москва: МГУ, 2011. – Т. 1. 787 С. 422-429.

6. Современные проекты FPGA-лаборатории ДонНТУ /Ю.Е. Зинченко, В.И. Калашников, О.Н. Дяченко, Т.А. Зинченко //Иновационные перспективы Донбасса: сборник трудов Международной научно-практической конференции в рамках I-го Международного научного форума ДНР «Донбасс-2015», 20-22 мая 2015 / Донецк: ДонНТУ. – 2015. – С. 4.

7. *Зинченко Ю.Е.* Адаптивный подход к генерации псевдослучайных тестов цифровых устройств /Ю. Е. Зинченко, А. А. Корченко //Научные труды Донецкого национального технического университета. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – Вып. 9 (179). – С. 360-365.

8. *Зинченко Т. А., Зинченко Ю. Е., Дяченко О. Н..* Разработка архитектуры интегрированной система генерации псевдослучайных тестов цифровых устройств //Информатика и кибернетика, № 4 (26), 2021, Донецк: ДонНТУ.

9. *Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И..* OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. - 200 с.

10. *Brgles F.* Combinational profiles of sequential benchmark circuits / F. Brgles, D. Bryan, K. Kozminski // International symposium of circuits and systems, ISCAS-89. – 1989.– p. 1929-1934.

11. Сайт лаборатории ДонНТУ «FPGA-технологии проектирования и диагностика компьютерных систем». – Донецк: ДонНТУ, [URL: http://fpga.domtu.ru](http://fpga.domtu.ru).

Зинченко Юрий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной инженерии ФГОУВО «Донецкий национальный технический университет» руководитель лаборатории «FPGA-технологии проектирования и диагностика компьютерных систем», Россия (ДНР), город Донецк, улица Артема 58, 283001, телефон: +7(949) 486-55-46, email: zinchenko.yuri@gmail.com.

Зинченко Татьяна Анатольевна, старший преподаватель кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта ФГОУВО «Донецкий национальный технический университет», Россия (ДНР), город Донецк, улица Артема 58, 283001, телефон: +7(949)334-91-53, email: zinchenko.tatyana@gmail.com.

Zinchenko Yuriy Evgenievich, candidate of technical sciences, associate professor of the computer engineering department of the "Donetsk National Technical University", leader of the laboratory "FPGA technologies for designing and diagnostics of comput-

er systems", Russia (DPR), Donetsk, Artema street 58, 347900, phone: +7(949) 486-55-46, email: zinchenko.yuri@gmail.com.

Zinchenko Tatyana Anatolyevna, senior lecturer of the Applied Mathematics and Artificial Intelligence Department of the "Donetsk National Technical University", Russia (DPR), Donetsk, Artema street 58, 347900, phone: +7(949)334-91-53, email: zinchenko.tatyana@gmail.com.