

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.33.054

Лукашик  
Екатерина Васильевна

Методы и средства формирования управляемых вероятностных тестовых  
последовательностей

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание академической степени  
магистра технических наук

по специальности 1-40 80 05 – Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Научный руководитель  
Ярмолик В.Н.  
д.т.н., профессор

Минск 2017

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

На данный момент существует множество современных вычислительных систем, таких как встроенные системы (Embedded System), системы на кристалле (System-on-a-Chip) и сети на кристалле (Net-on-a-Chip). Характерной особенностью подобных вычислительных систем является тесное взаимодействие их аппаратных и программных средств, причем подавляющую часть аппаратных средств представляют собой запоминающие устройства различного уровня иерархии системы. Использование вычислительных систем, аппаратное или программное обеспечение которых выдает неверные результаты на некоторых комбинациях входных данных, будет проблематичным и даже опасным. Возникает вопрос о способах обеспечения необходимого качества и надежности разрабатываемых объектов.

Тестирование – этап проверки качества разработанных устройств. Тестирование продукта заключается в запуске устройства на некотором множестве данных и сопоставлении полученных результатов с ожидаемыми (эталонными) с целью установить удовлетворяет ли приложение возложенным задачам [1]. Являясь важным этапом разработки, тестирование вносит значительный вклад в общую трудоемкость процесса разработки. При автоматизированном тестировании для выполнения тестов и проверки результатов используются программные средства. Автоматизация тестирования при правильном применении позволяет значительно снизить время, необходимое на тестирование.

Один из наиболее эффективных видов автоматизированного тестирования является исчерпывающее тестирование, применяя которое, проверку на ошибки можно выполнить, введя все возможные варианты входных значений. Однако всесторонние испытания такого рода являются трудоемкими и дорогостоящими. В настоящее время используются различные аппроксимации исчерпывающего тестирования, к примеру, широко применяющееся на практике вероятностное тестирование и его модификации, управляемые вероятностные тесты – одна из них [1,2].

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Цель и задачи исследования

*Целью* диссертационной работы является исследование методов и средств формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести анализ методов и средств формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей.

2. Произвести анализ применяемых критериев и численных метрик для формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей.

3. Разработать архитектуру программной системы для генерации и экспериментальной оценки эффективности управляемых вероятностных тестов.

4. Реализовать ПО для формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей.

5. Провести экспериментальные исследования разработанной системы.

*Объектом* исследования являются управляемые вероятностные тестовые последовательности.

*Предметом* исследования является методы и средства, алгоритмы формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей.

Основной *гипотезой*, положенной в основу диссертационной работы, является то, что исследование методов и средств формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей позволит получить их наиболее эффективные модификации для тестирования программного и аппаратного обеспечения вычислительных систем.

### **Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики**

Работа выполнялась в соответствии с научно-техническим заданием и планом работ кафедры «Программное обеспечение информационных технологий» по теме «Разработка моделей, методов, алгоритмов, повышающих показатели проектирования, внедрения и эксплуатации программных средств для перспективных платформ обработки информации, решения интеллектуальных задач, работы с большими массивами данных и внедрение в современные обучающие комплексы» (ГБ № 16-2004, № ГР 20163588, научный руководитель НИР – Н. В. Лапицкая).

### **Личный вклад соискателя**

Результаты, приведенные в диссертации, получены соискателем лично. Вклад научного руководителя В. Н. Ярмолика заключается в формулировке

целей и задач исследования, предоставлении материалов по теме исследования.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI Международной научно-практической телеконференции «EurasiaScience» (Москва, Россия, 2016), 51-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, Беларусь, 2015).

### **Опубликованность результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 2 печатные работы, из них 2 работы в сборниках трудов и материалов международных конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора и приложений. В первой главе произведен анализ методов и средств формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей, во второй – анализ критериев и применяемых численных метрик для формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей. Третья глава посвящена разработке архитектуры программной системы для экспериментальной оценки эффективности управляемых вероятностных тестов. В четвертой описывается реализованное ПО для формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей и проведены экспериментальные исследования разработанной системы.

Общий объем работы составляет 67 страниц, из которых основного текста – 45 страниц, 27 рисунков на 10 страницах, 8 таблиц на 7 страницах, список использованных источников из 32 наименований на 2 страницах и 2 приложения на 4 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** определена область и указаны основные направления исследования, показана актуальность темы диссертационной работы, обозначена практическая ценность работы.

В **первой главе** выявлено, что управляемое вероятностное тестирование требует меньших временных затрат и обеспечивает большую покрывающую способность, что объясняет его эффективность в сравнении с другими видами тестирования и позволяет применять его для развития и совершенствования процесса обнаружения неисправностей программного и аппаратного обеспечения вычислительных систем. В ходе анализа было определено, что ключевой особенностью управляемого генерирования вероятностных тестовых наборов является информация, которая извлекается в виде некоторых характеристик (метрик) из ранее сгенерированных тестовых наборов и используется для формирования очередного тестового набора. Для методов управляемого вероятностного тестирования с  $N$  входами и пространством входных наборов, состоящим из  $2^N$  двоичных наборов (векторов) приведены следующие определения:

– тест  $T$  представляет собой множество из  $q < 2^N$  тестовых наборов  $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{q-1}$ , где  $T_i = t_{i,N-1}t_{i,N-2} \dots t_{i,2}t_{i,1}t_{i,0}$ , и  $t_{i,j} \in \{0,1\}$ , а  $N$  является размером набора в битах;

– управляемым вероятностным тестом  $SRT = \{T_0, T_1, T_2, \dots, T_{q-1}\}$  является тест  $T$ , состоящий из сгенерированных случайным образом тестовых наборов  $T_i$ ,  $i \in \{0,1,2, \dots, q-1\}$ , таких, что  $T_i$  удовлетворяет некоторому критерию, либо критериям, полученным на основании предыдущих наборов  $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$ .

Очередной тестовый набор  $T_i$  управляемого вероятностного теста формируется максимально отличным от ранее сгенерированных наборов. В данном случае принимается гипотеза, что для двух тестовых наборов, имеющих минимальное различие, количество обнаруживаемых неисправностей (ошибок) будет минимальным и, наоборот, для максимально различных тестовых наборов обнаруживающая способность будет максимальной. Сравнительная характеристика различных способов формирования данных тестовых наборов показала, что тесты с расстоянием Евклида обладают большей покрывающей способностью, однако скорость их генерации ниже, чем у тестов с расстоянием Хемминга и быстрых антислучайных тестов. Оптимальный управляемый вероятностный тест обладает лучшей покрывающей способностью, но имеет ограничение по длине.

**Вторая глава** посвящена анализу критериев и применяемых численных метрик для формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей, который показал, что одним из первых подходов к управляемому формированию случайных тестовых наборов является применение в качестве меры отличия тестового набора  $T_i$  от предыдущих наборов  $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$  расстояния Хемминга. Данные характеристики

определяются для двоичных тестовых наборов  $T_i$  и  $T_j$ , где, как было указано в предыдущей главе, расстояние Хемминга  $HD(T_i, T_j)$  вычисляется как вес  $w(T_i \oplus T_j)$  вектора  $T_i \oplus T_j$  согласно формуле 1.1.

$$HD(T_i, T_j) = w(T_i \oplus T_j) = \sum_{l=0}^{N-1} (t_{i,l} \oplus t_{j,l}). \quad (1.1)$$

При формировании набора  $T_i$ , когда  $i$  меньше двух, применяются суммарные значения расстояний  $T_i$  по отношению к предыдущим наборам  $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$  [1, 2]. Тогда для очередного набора  $T_i$  суммарное значение расстояний относительно  $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$  вычисляется как

$$THD(T_i) = \sum_{j=0}^{i-1} HD(T_i, T_j), \quad (1.2)$$

где  $THD(T_i)$  – суммарное расстояние Хемминга [1, 2].

В ходе анализа было выдвинуто предположение, что для улучшения покрывающей способности данных тестов следует двукратно применить расстояние Хэмминга. Для тестов с однократным применением расстояния Хэмминга кандидаты выбираются случайным образом, для ТДРХ задается минимальное расстояние Хэмминга в качестве меры различия предыдущего набора и каждого кандидата. Таким образом формируется буфер с кандидатами, из которого выбирается кандидат в набор  $T_i$  с максимальным суммарным расстоянием Хэмминга. Данное предположение проверяется экспериментально в четвертой главе.

Тестом с однократным применением расстояния Евклида является тест  $T$ , состоящий из сгенерированных случайным образом тестовых наборов  $T_i = t_{i,N-1}t_{i,N-2} \dots t_{i,2}t_{i,1}t_{i,0}$ , где  $t_{i,l} \in \{0,1\}$ ,  $i \in \{0,1,2, \dots, q-1\}$ , а  $N$  является размером набора в битах. В качестве меры отличия тестового набора  $T_i$  от предыдущих наборов  $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$  используется Евклидово расстояние. Данные характеристики определяются для двоичных тестовых наборов  $T_i$  и  $T_j$ , где расстояние  $ED(T_i, T_j)$  определяется в соответствии с выражением 1.3.

$$ED(T_i, T_j) = \sqrt{\sum_{l=0}^{N-1} (t_{i,l} - t_{j,l})^2} = \sqrt{\sum_{l=0}^{N-1} (t_{i,l} \oplus t_{j,l})} = \sqrt{HD(T_i, T_j)}. \quad (1.3)$$

При формировании набора  $T_i$ , когда  $i > 2$ , применяются суммарные значения расстояний  $T_i$  по отношению к предыдущим наборам  $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$ . Тогда для очередного набора  $T_i$  суммарное значение расстояний относительно  $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$  вычисляется как

$$TED(T_i) = \sum_{j=0}^{i-1} ED(T_i, T_j), \quad (1.4)$$

где  $TED(T_i)$  – суммарное расстояние Евклида.

Тесты с двукратным применением расстояния Евклида – модификация ТОПРЕ. Для тестов с однократным Евклидовым расстоянием кандидаты выбираются случайным образом, для ТДРХ задается минимальное Евклидово расстояние в качестве меры различия предыдущего набора и каждого кандидата. Таким образом формируется буфер с кандидатами, из которого выбирается кандидат в набор  $T_i$  с максимальным суммарным расстоянием Евклида  $TED(T_i)$ .

Генерирование быстрых антислучайных тестов основано на нахождении центроидов, вычисляемых на основании предыдущих наборов  $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$  для  $T_i = t_{i,N-1}, t_{i,N-2}, \dots, t_{i,2}, t_{i,1}, t_{i,0}$ . Согласно алгоритму тестовые наборы  $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$  рассматриваются как двумерные массивы  $i \times N$  бит. Для каждого столбца  $l \in \{N-1, N-2, N-3, \dots, 1, 0\}$  значение  $l$ -го элемента  $c_l$  центроида  $C = c_{N-1}, c_{N-2}, \dots, c_2, c_1, c_0$  определяется как сумма  $t_{i,l} \in \{0, 1\}$  деленная на количество  $i$  строк. В результате получается центроид, элементы которого  $c_l$  принимают значения в интервале от 0 до 1. Далее FAR алгоритм округляет значения  $c_l$  до 0, если  $c_l < 0,5$  или до 1, если  $c_l > 0,5$ . В случае, когда  $c_l = 0,5$  FAR алгоритм случайным образом равновероятно округляет  $c_l$  до 0 или 1. Как результат приведенных преобразований формируется двоичный центроид  $C_b$ . На финальном этапе генерируется  $T_i$  как результат инвертирования  $C_b$ , то есть  $T_i = \bar{C}_b$ .

Рассмотрены также тестовые последовательности с полу-максимальным расстоянием (SMDTS) для которых каждый тестовый набор теста имеет свое инверсное значение. Для таких тестов были предложены новые характеристики для оценки расстояния при генерировании очередного тестового набора  $T_i$ . По сути предложенные THD(T) и TED(T) представляют собой суммарное расстояние Хемминга и суммарное Евклидово расстояние соответственно, для теста T состоящего из q тестовых наборов, и вычисляется как:

$$THD(T) = \sum_{i=1}^{q-1} \sum_{j=0}^{i-1} HD(T_i, T_j); \quad (1.5)$$

$$TED(T) = \sum_{i=1}^{q-1} \sum_{j=0}^{i-1} ED(T_i, T_j). \quad (1.6)$$

Здесь  $HD(T_i, T_j)$  и  $ED(T_i, T_j)$  вычисляются для всех  $i \neq j; j, j \in \{0, 1, \dots, q-1\}$ .

Тесты с полным максимальным расстоянием (TMDTS) являются дальнейшим развитием SMDTS. Для их генерирования одновременно используются обе метрики THD и TED в соответствии со следующей процедурой.

Построение TMDTS для  $q=2k$ .

1. Первый тестовый набор  $T_0$  генерируется как случайный двоичный N разрядный вектор.

2. Для получения очередного  $i$ -го набора  $T_1, T_3, T_5, \dots, T_{2k-1}$  с нечетным индексом используется соотношение  $T_{2k+1} = \bar{T}_{2k}$ , которое для  $k=0$  принимает вид  $T_1 = \bar{T}_0$ .

3. Для получения каждого нового набора  $T_2, T_4, T_6, \dots, T_{2k-2}$  с четным индексом из множества возможных кандидатов в тесты выбирается такой для которого  $TED(T)$  принимает максимальное значение, причем для вычисления  $TED(T)$  используются ранее сгенерированные тестовые наборы.

4. Этапы 2 и 3 повторяются до тех пор, пока все  $q$  наборов не будут сгенерированы.

Очевидно, что наиболее трудоемким является этап 3, который требует большого объема вычислений.

Было выявлено, что основным недостатком SMDTS и TMDTS является ограничение длины таких тестов. Также в данной главе приведена универсальная метрика, которая позволяет оценить эффективность полученных последовательностей.

В **третьей** главе была спроектирована архитектура программной системы для генерации и экспериментальной оценки эффективности управляемых вероятностных тестов, определена цель, составлена спецификация требований к программному средству, выбрана технология программирования Microsoft .NET Framework 4 и язык C#. В качестве среды разработки была выбрана Visual Studio, т.к. она лучше всего поддерживает написание приложений на языке C#. Базовой операционной системой для приложения была выбрана Microsoft Windows 8, как современная, отвечающая всем необходимым параметрам операционная система. Для разработки удобного и многофункционального графического пользовательского интерфейса выбор был остановлен на технологии Windows Presentation Foundation (WPF), которая является системой для построения клиентских приложений Windows с визуально привлекательными возможностями взаимодействия с пользователем, пришедшая на смену Windows Forms. Также была разработана общая структура программного средства, диаграмма классов и необходимые алгоритмы.

В **четвертой** главе представлена реализованная система, которая позволяет генерировать различные виды управляемых вероятных тестов, также анализировать их эффективность, имеет удобный понятный интерфейс. С помощью данной системы были получены следующие графики:

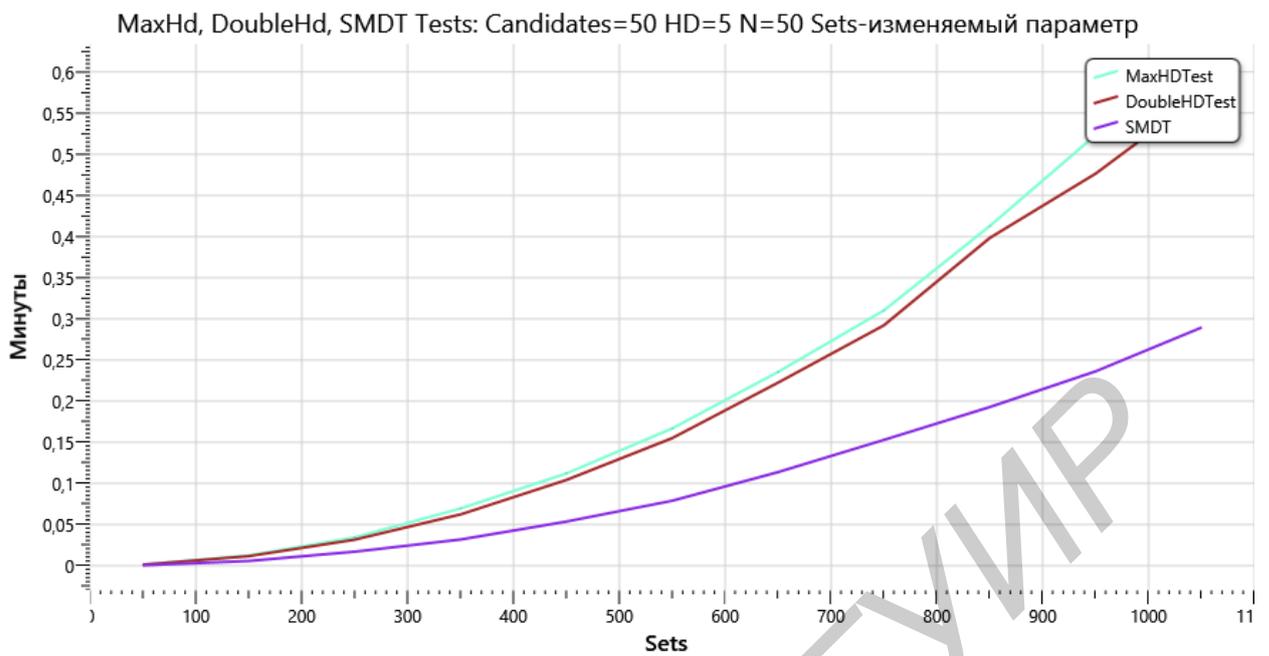


Рисунок 1 – График времени построения ТОПРХ, ТДПРХ, SMDT с изменяемым параметром Sets

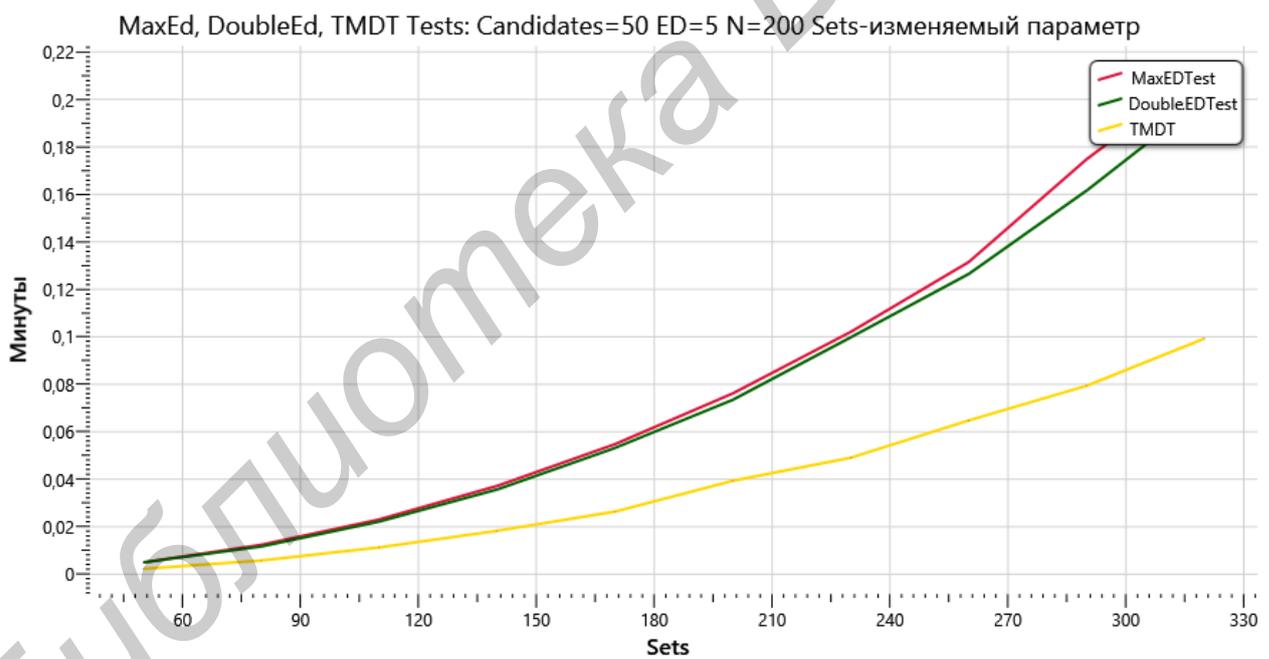


Рисунок 2 – График времени построения ТОПРЕ, ТДПРЕ, TMDT с изменяемым параметром Sets

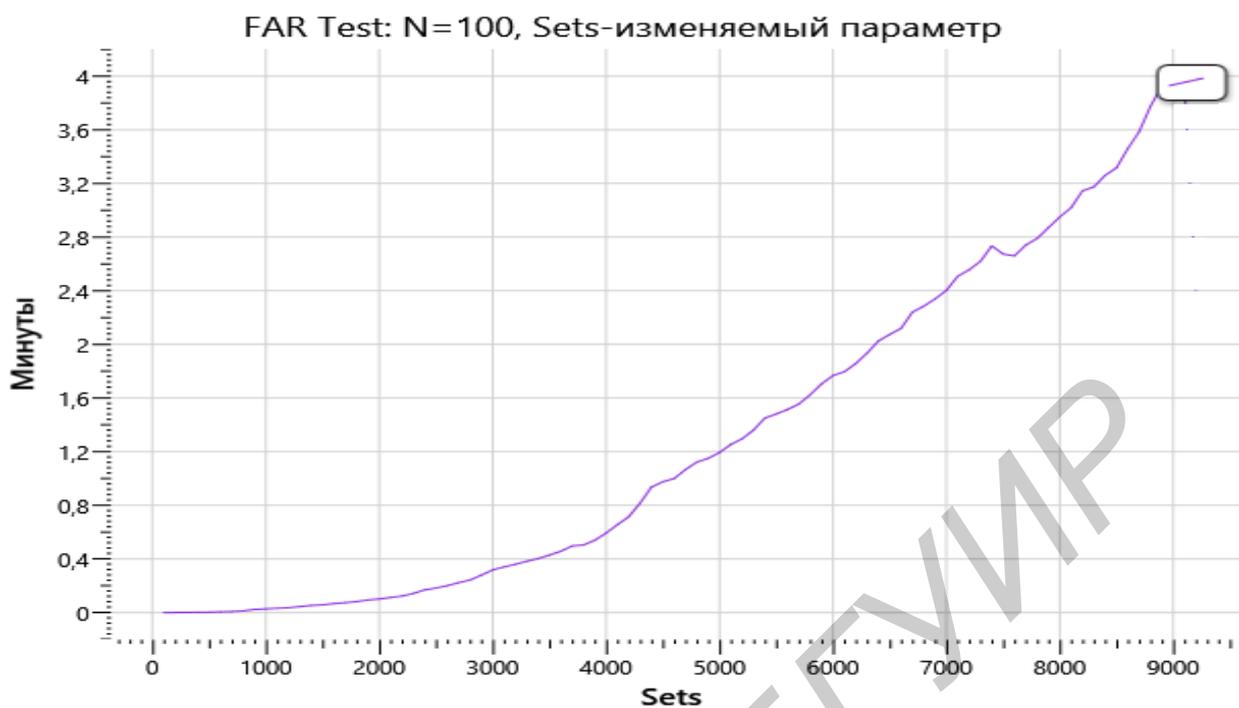


Рисунок 3 – График времени построения быстрого антирандомного теста с изменяемым параметром Sets

Полученное программное средство позволило получить данные о покрывающей способности различных тестов, эти данные представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Оценка покрывающей способности тестов с применением расстояния Хэмминга

Название теста	HD	К	Покрывающая способность, %
ТОПРХ	-	2	100
		3	99,97
		4	96,72
ТДПРХ	5	2	99,96
		3	95,42
		4	78,4
	25	2	100
		3	99,98
		4	97,87
SMDT	5	2	99,87
		3	93,05
		4	74,53
	25	2	100
		3	99,91
		4	96,89

Таблица 2 – Оценка покрывающей способности тестов с применением расстояния Евклида

Название теста	ED	К	Покрывающая способность, %
ТОПРЕ	-	2	100
		3	99,98
		4	96,78
ТДПРЕ	2	2	99,97
		3	93,04
		4	72,94
	5	2	100
		3	99,99
		4	97,92
TMDT	2	2	99,6
		3	92,6
		4	73,07
	5	2	100
		3	99,98
		4	96,81

Таблица 3 – Оценка покрывающей способности быстрого антирандомного теста

Test Type	К	Покрывающая способность, %
FAR	2	100
	3	99,94
	4	96,21

Проведенные с помощью данной системы экспериментальные исследования и анализ метрикой показали, что быстрый антирандомный тест генерируется намного быстрее остальных тестов, однако имеет меньшую покрывающую способность, в свою очередь тесты с двукратным применением расстояния Хэмминга/Евклида при правильно подобранной метрике показали лучшую покрывающую способность и среднюю временную сложность генерирования.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Произведен анализ эффективности вероятностных тестов для тестирования программного и аппаратного обеспечения вычислительных систем, на основании анализа предложены цели, которые необходимо достичь, задачи которые необходимо решить, выявлена актуальность изучаемой темы.

2. Исследованы принципы и методологии управления формированием вероятностных управляемых тестов, в ходе исследования определена ключевая особенность управляемого генерирования вероятностных тестовых наборов.

3. Произведена сравнительная характеристика наиболее известных методов построения вероятностных управляемых тестов, выявлены их достоинства и недостатки, выведен оптимальный управляемый вероятностный тест.

4. Произведен анализ критериев и применяемых численных метрик для формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей, на основании анализа предложены модификации рассмотренных метрик. Изучена универсальная метрика для определения покрывающей способности управляемых вероятностных тестовых последовательностей.

5. Разработана архитектура программной системы для генерации и экспериментальной оценки эффективности управляемых вероятностных тестов, определена спецификация требований к программному средству, предложен выбор технологий, общая структура программного средства, алгоритмы, методы, объекты.

6. Реализовано ПО для формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей, проведены экспериментальные исследования разработанной системы, в результате выявлены наиболее быстро генерируемые и наиболее эффективные среди реализованных методов построения вероятностных управляемых тестов.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Полученные результаты формируют теоретическую и практическую базу для разработки ПО компьютерных систем для формирования управляемых вероятностных тестовых последовательностей. Они могут быть использованы для модернизации и дальнейшего развития существующих систем.

2. Реализованная система протестирована и готова к использованию, позволяет генерировать различные виды управляемых вероятных тестов, также анализировать их эффективность, имеет удобный понятный интерфейс.

3. Проведенные с помощью данной системы экспериментальные исследования и анализ метрикой, а также сгенерированные тестовые

последовательности могут использоваться для производства эффективного тестирования программного и аппаратного обеспечения вычислительных систем.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1-А. Лукашик, Е.В. Управляемые вероятностные тестовые последовательности и их модификации/ Е.В. Лукашик// «EurasiaScience» : материалы VI Международной научно-практической телеконференции. – Москва, Россия, 2016. – с. 78-80.

2-А. Лукашик, Е.В. Тестирование средств вычислительной техники с помощью управляемых вероятностных последовательностей/ Е.В. Лукашик// Компьютерные системы и сети: материалы 51-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. – Минск: БГУИР, 2015. – с.56-58.

Библиотека БГУИР