

На правах рукописи

Тан Найнг Со

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТОХАСТИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ

05.13.11 – математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

05.13.19 – методы и системы защиты информации,
информационная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2007

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте
(государственном университете)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Иванов Михаил Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Чалый Виктор Дмитриевич,
кандидат технических наук,
Косых Петр Александрович

Ведущая организация: Московский энергетический институт
(технический университет)

Защита диссертации состоится “_____” _____ г. в _____ часов
___ минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.03 в
Московском инженерно-физическом институте (государственном
университете) по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Автореферат разослан “_____” _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Шумилов Ю.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важным элементом любой защищенной компьютерной системы, независимо от ее сложности и назначения, являются программные и программно-аппаратные средства генерации псевдослучайных последовательностей (ПСП). Можно выделить следующие задачи, для решения которых используются генераторы ПСП: техническое диагностирование компонентов КС (в том числе встроенное диагностирование); оперативный контроль хода выполнения программ и микропрограмм с использованием сторожевых процессоров (Watchdog Processors); моделирование; помехоустойчивое стохастическое кодирование; обеспечение безопасности программных систем.

Именно от свойств генераторов ПСП, особенно в тех случаях, когда необходимо обеспечить устойчивую работу программной системы при наличии случайных и умышленных деструктивных воздействий, в значительной степени зависит надежность процессов сбора, обработки, хранения и передачи информации. К программным средствам генерации ПСП предъявляются жесткие требования, в первую очередь по таким параметрам, как непредсказуемость, безопасность реализации, статистические и периодические свойства.

В настоящее время существует трудно разрешимое противоречие между непредсказуемостью генераторов ПСП и их производительностью. Другая проблема, с которой приходится сталкиваться при разработке программных средств генерации ПСП, – отсутствие инструментальных средств для статистического исследования формируемых ПСП, для оценки качества основных строительных блоков, на основе которых формируются последовательности. Более того, этим исследованиям до недавнего времени уделялось мало внимания. За последние несколько лет ситуация кардинально изменилась, специалисты признали значимость статистического тестирования. Об этом свидетельствуют многочисленные факты.

1) Национальный Институт Стандартов и Технологий США (НИСТ) выпустил многостраничное руководство по статистическому тестированию генераторов ПСП ответственного назначения.

2) При проведении многолетнего открытого международного конкурса (завершившегося в 2001 году) на принятие американского стандарта AES для оценки алгоритмов-кандидатов активно использовались статистические исследования ПСП.

3) Появились программные комплексы для проведения статистических испытаний генераторов ПСП (наиболее известные из них – DIEHARD, CRYPT-X, Система оценки качества генераторов ПСП (СОК)).

Однако существующие программные комплексы являются либо узкоспециализированными (например, DIEHARD предназначен для исследования лишь конгруэнтных генераторов), либо малофункциональными (например, CRYPT-X содержит всего лишь пять тестов, в то время как в руководстве НИСТ описано шестнадцать). В наиболее функциональном комплексе СОК, разработанном И.В.Чугунковым (МИФИ) отсутствуют встроенные генераторы ПСП, нет возможности проводить исследования основных строительных элементов генераторов ПСП – S- и R-блоков.

Поэтому **актуальными научными задачами** являются:

1) Создание новых алгоритмов генерации ПСП, сочетающих в себе непредсказуемость, высокое быстродействие и эффективную программную реализацию на различных платформах. Одним из направлений решения данной задачи является совершенствование стохастических алгоритмов формирования цифровых последовательностей, основанных на использовании стохастических сумматоров, т. е. сумматоров с непредсказуемым результатом работы, впервые предложенных С.А.Осмоловским для решения задач помехоустойчивого кодирования. Стохастические генераторы ПСП сочетают в себе высокое качество формируемых последовательностей и эффективную программную реализацию.

2) Разработка структуры и определение функций отдельных компонентов программного комплекса, позволяющего проводить полнофункциональное статистическое исследование ПСП, в том числе проводить испытания на всех существующих графических и оценочных тестах, оценивать качество основных строительных элементов генераторов ПСП.

Целями диссертационной работы являются:

- разработка инструментальных средств оценки качества генераторов ПСП, ориентированных на решение задач защиты программных систем;

- разработка алгоритмов генерации ПСП, сочетающих в себе высокое быстродействие при программной реализации и качество формируемых последовательностей, приемлемое для большинства приложений.

Для достижения поставленных целей необходимо решение **следующих задач**:

- Разработка классификации генераторов ПСП;
- Анализ методов оценки качества стохастических алгоритмов;
- Разработка структуры, состава и интерфейса пользователя программного комплекса, предназначенного для исследования стохастических алгоритмов;
- Разработка программных средств оценки качества S-блоков;
- Разработка и исследование генераторов ПСП на основе R-блоков;
- Исследование существующих алгоритмов генерации ПСП;

Методы исследований. При проведении исследований и работ в диссертационной работе были использованы теория конечных полей, теория линейных последовательностных машин, математическая статистика.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- разработана классификация существующих алгоритмов генерации ПСП;
- сформулированы требования, предъявляемые к системе оценки качества ПСП, и проведен анализ существующих систем аналогичного назначения;
- разработана структура и определен состав компонентов программного комплекса для оценки качества генераторов ПСП;
- разработан новый алгоритм генерации ПСП, обеспечивающий гарантированную нижнюю границу значения формируемой последовательности;

- предложен новый стохастический итерационный алгоритм генерации ПСП, сочетающий достоинства двух существующих архитектур, использующихся при построении блочных преобразований, – «Петли Фейстеля» и «Квадрата»;

- впервые проведено исследование R-блоков на предмет выявления тех таблиц стохастического преобразования, которые порождают нелинейные M-последовательности.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- в результате экспериментальных исследований впервые определены наиболее эффективные таблицы стохастического преобразования, при практическом использовании которых порождаются нелинейные ПСП максимальной длины;
- создан программный комплекс, предназначенный для исследования статистической безопасности алгоритмов генерации ПСП;
- разработаны программные средства оценки качества блоков замены и блоков стохастического преобразования;
- разработан программный комплекс, предназначенный для демонстрации особенностей применения стохастических методов при решении задач защиты программных систем.

Реализация результатов. Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Компьютерные системы и технологии» МИФИ (курс лекций и лабораторный практикум «Методы и средства защиты компьютерной информации»).

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на научных сессиях МИФИ-2005, 2006, 2007, 62-й научной сессии, посвященной дню Радио (Москва, 2007).

Публикации. По теме работы опубликованы 7 печатных работ, в том числе 4 тезиса докладов на научных сессиях МИФИ, материалы в каталоге экспонатов выставки «Телекоммуникации и новые информационные технологии в образовании», статья в журнале «Инженерная физика» и доклад в сборнике научных трудов Российского НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С.Попова.

Структура работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и 5 приложений. Основной материал изложен на 100 страницах и содержит 31 рисунок. Список литературы содержит 65

наименований. В приложениях приведены основные результаты исследований генераторов ПСП на регистрах сдвига с нелинейными обратными связями на основе использования стохастических сумматоров, описан интерфейс пользователя разработанных программных комплексов.

На защиту выносятся:

- структура программного комплекса для исследования статистических свойств ПСП и оценки качества S- и R-блоков, включающего в себя систему для проведения графических и оценочных статистических тестов, встроенные генераторы ПСП различных типов;
- новый алгоритм генерации ПСП, обеспечивающий гарантированную нижнюю границу значения периода формируемой последовательности;
- стохастический итерационный алгоритм генерации ПСП, сочетающий достоинства двух существующих архитектур, использующихся при построении блочных преобразований – «Петли Фейстеля» и «Квадрата»;
- результаты исследований R-блоков на предмет выявления тех таблиц стохастического преобразования, которые порождают нелинейные M-последовательности.
- классификация генераторов ПСП;
- результаты исследования статистической безопасности стохастических алгоритмов, в том числе алгоритмов генерации ПСП и алгоритмов заполнения ключевых таблиц S- и R-блоков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследований, представлены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются задачи обеспечения безопасности программных систем, решаемые стохастическими методами. Обосновывается справедливость утверждения об универсальности стохастических методов. Описывается разработанная классификация генераторов ПСП. Формулируются требования к качест-

венным генераторам ПСП. Рассматриваются существующие подходы к анализу статистической безопасности стохастических алгоритмов.

На рис. 1 показана разработанная классификация алгоритмов генерации ПСП, параметрами которой являются: тип используемой нелинейной функции; структура генератора; использование внешних источников случайности; принцип управления синхронизацией; принцип получения выходной последовательности; принцип использования блоков замены и блоков стохастического преобразования (S- и R-блоков); наличие каскадов.

Наибольшего внимания с точки зрения совокупности критериев непредсказуемость-быстродействие заслуживают генераторы ПСП итерационного блочного типа. Принцип построения нелинейной функции E_k такого генератора ПСП, предложенный К.Шенноном, можно сформулировать следующим образом. Функция E_k суть многораундовое (итерационное) преобразование, заключающееся в многократном повторении операций замены, перестановки и сложения с раундовым ключом. Полученное преобразование в результате приобретает свойства рассеивания и перемешивания. Свое практическое воплощение этот принцип нашел в архитектурах, получивших названия «Петля Фейстеля» и «Квадрат». Можно сформулировать следующие направления совершенствования блочных алгоритмов генерации ПСП с архитектурой «Квадрат»:

- Использование вместо операции сдвига строк «ShiftRows» операции перемешивания строк «MixRows» со свойствами, аналогичными операциям перемешивания столбцов «MixColumns»;
- Переход от архитектуры «Квадрат» к архитектуре «Куб»;
- Использование модифицированной архитектуры «Квадрат» при реализации раундовой функции с архитектурой «Петля Фейстеля», отвечающей за взаимодействие с раундовым ключом, а также рассеивание и перемешивание информации (рис. 2). Этот подход впервые предложен в рамках данной работы. При этом предлагается структура нелинейной функции генератора ПСП, показанная на рис. 3.

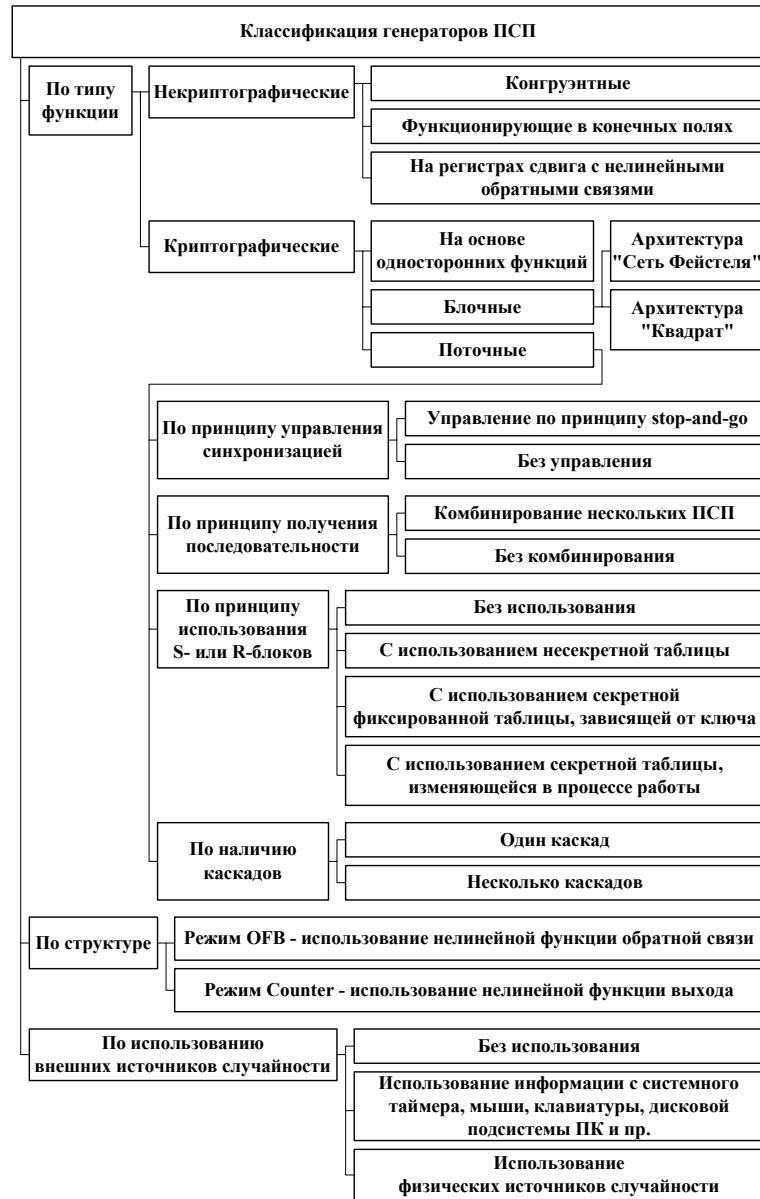


Рис. 1. Классификация генераторов ПСП

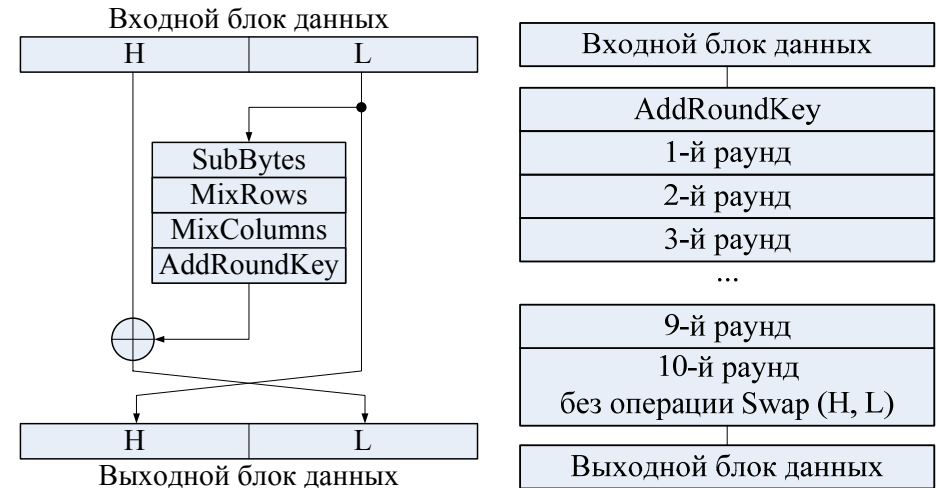


Рис. 2. Структура раунда блочного алгоритма генерации ПСП «Di-Tech»

Рис. 3. Нелинейное преобразование генератора ПСП «Di-Tech»

Во второй главе рассматриваются генераторы ПСП, основанные на использовании регистров сдвига со стохастическими сумматорами в цепи обратной связи (RFSR, Random Feedback Shift Register).

Модель стохастического сумматора (R-блока) может быть записана следующим образом.

Вход: A, B, H, Addr
 $A = \text{Addr}(A)$
 $B = (A + B) \bmod 256$
 Out = H(B)

Ключевая информация R-блока - заполнение таблицы

$$H = \{H(m)\}, m = 0 \dots (2^n - 1),$$

размерности $n \times 2^n$, содержащей элементы $GF(2^n)$, перемешанные случайным образом, т.е. $H(m) \in GF(2^n)$. Результат $R_n(A, B)$ преобразования входного n-разрядного двоичного набора A зависит от заполнения таблицы H и параметра преобразования B, задающего смещение в таб-

лице относительно ячейки, содержащей значение A , следующим образом

$$R_H(A, B) = H((m_A + B) \bmod 2^n),$$

где m_A - адрес ячейки таблицы H , содержащей код A , т.е. $H(m_A) = A$. Результат работы R -блока суть считывание содержимого ячейки таблицы H , циклически смещенной на B позиций в сторону старших адресов относительно ячейки, содержащей код A . Для ускорения преобразования в состав R -блока вводится вспомогательный адресный массив

$$\text{Addr} = \{\text{Addr}(j)\}$$

размерности $n \times 2^n$, причем

$$\forall j = 0..(2^n - 1) \text{Addr}(j) = m_j.$$

Ячейка с адресом j в массиве Addr хранит адрес ячейки массива H , содержащей код j . При записи в каждую ячейку массивов H и Addr ее собственного адреса получаем классический сумматор по модулю 2^n , а значит с полным основанием R -блок может быть назван *стохастическим сумматором*, т.е. сумматором с непредсказуемым результатом работы, зависящим от заполнения ключевой таблицы H .

Уравнения работы RFSR имеют вид

$$Q_0^{(t+1)} = R(Q_i^{(t)}, Q_{N-1}^{(t)}),$$

$$Q_j^{(t+1)} = Q_{j-1}^{(t)}, j = 1 \dots (N - 1),$$

где $Q_j^{(t)}$ и $Q_j^{(t+1)}$ - состояние j -го регистра соответственно в моменты времени t и $t + 1$, $j = 0 \dots (N - 1)$.

В качестве вектора инициализации может использоваться начальное состояние регистров

$$Q_0^{(0)} Q_1^{(0)} \dots Q_{N-1}^{(0)}.$$

В работе демонстрируется важный факт существования таблиц стохастического преобразования, на основе которых появляется возможность строить нелинейные генераторы ПСП длиной $2^Q - 1$, где Q - число элементов памяти генератора. Описываются новые алгоритмы генерации ПСП на основе стохастических сумматоров, гарантированно обеспечивающие заданную минимальную величину периода формируемой последовательности, равную $2^N - 1$, где N - число регистров генератора. Впервые проведены и представлены результаты экспериментальных исследований генераторов ПСП на основе стохастических

сумматоров в части определения ключевых таблиц, обеспечивающих получение нелинейных M -последовательностей.

Учитывая, что не все таблицы стохастического преобразования порождают генераторы нелинейных M -последовательностей, важной задачей, возникающей при использовании генераторов ПСП на основе R -блоков, является обеспечение гарантированной нижней границы значения периода формируемой последовательности.

Предлагается алгоритм (рис. 4) заполнения ключевой таблицы H разрядности $(n + 1)$, решающий эту задачу. Суть алгоритма заключается в использовании двух таблиц H_1 и H_2 разрядности n . Таблица H_1 служит для заполнения старших разрядов ячеек результирующей таблицы H с четными адресами, таблица H_2 служит для заполнения старших разрядов ячеек результирующей таблицы H с нечетными адресами. Младшие разряды ячеек таблицы H с четными адресами заполняются «0», младшие разряды ячеек таблицы H с нечетными адресами заполняются «1», как показано на рис. 5.

В частном случае, когда $H_1 = H_2$, эквивалентная схема $(n + 1)$ -разрядного генератора ПСП суть последовательное соединение двоичного регистра с линейными обратными связями (LFSR) и n -разрядного регистра сдвига с нелинейными обратными связями на основе R -блоков (RFSR) (рис. 6). В результате при выборе в качестве образующего многочлена примитивного многочлена степени N (где N - число регистров генератора ПСП) получаем в качестве генератора ПСП первой ступени генератор линейной двоичной M -последовательности. Так как период ПСП, формируемой результирующим генератором, не может быть меньше периода генератора первой ступени, цель оказывается достигнутой - период $(n + 1)$ -разрядного генератора ПСП на основе R -блока, ключевая таблица H которого имеет вид, показанный на рис. 5, при выборе в качестве базовой произвольной n -разрядной таблицы будет всегда не менее, чем $(2^N - 1)$.

В третьей главе формулируются требования к полнофункциональному программному комплексу для оценки качества стохастических алгоритмов. Должны быть реализованы все существующие статистические тесты, предназначенные для тестирования криптографических генераторов ПСП, к которым предъявляются наиболее жесткие требования. Должны быть реализованы как оценочные, так и графиче-

ские тесты. В составе комплекса должны присутствовать встроенные программные модели генераторов ПСП различных типов (на основе односторонних функций; блочные; поточные, в том числе на основе R-блоков; конгруэнтные и др.). Должны быть предусмотрены возможности по настройке параметров тестирования, в том числе уровня значимости тестов, длины и способа задания входной анализируемой последовательности и др.; а также возможности тестирования качества основных строительных блоков генераторов ПСП, в первую очередь блоков замены (S-блоков) и блоков стохастического преобразования (R-блоков) различной разрядности.

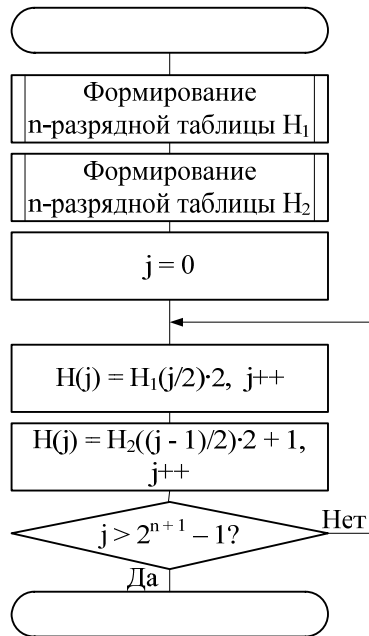


Рис. 4. Схема алгоритма формирования ключевой таблицы

На основе сформулированных требований разработаны структура и состав программного комплекса (рис. 7), в составе которого выделяются программные средства для анализа статистической безопасности генераторов ПСП и программные средства для оценки качества блоков замены и блоков стохастического преобразования.

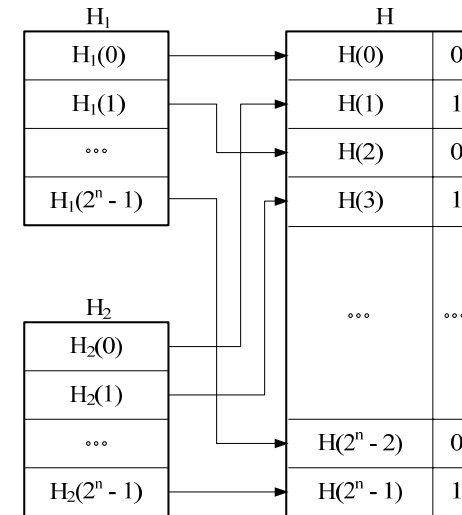


Рис. 5. Принцип формирования ключевой таблицы разрядности $(n + 1)$ из двух случайных таблиц разрядности n

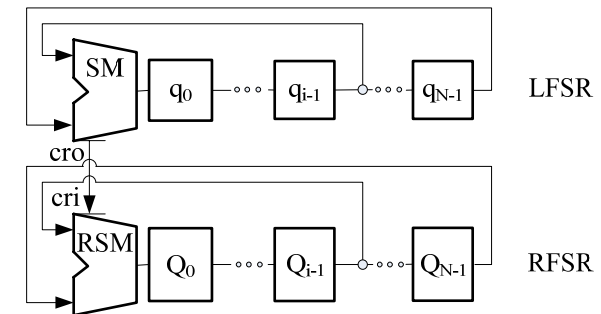


Рис. 6. Эквивалентная схема $(n + 1)$ -разрядного генератора ПСП. SM – одноразрядный сумматор, RSM – стохастический n -разрядный сумматор, cri – вход переноса, cro – выход переноса, q_i – разряд LFSR, Q_i – разряд RFSR

Основными достоинствами программного комплекса являются: наличие большого числа статистических тестов, предназначенных для оценки качества генераторов ПСП, к которым предъявляются наиболее жесткие требования, в том числе НИСТ и DIEHARD;

возможность проведения как оценочных, так и графических тестов, в том числе трех новых тестов; возможность настройки параметров тестирования; наличие встроенных генераторов ПСП; удобный интерфейс пользователя; встроенная система помощи.

В четвертой главе рассматриваются критерии выбора S-блоков и исследуются алгоритмы формирования ключевых таблиц S- и R-блоков. Описываются разработанные статистические тесты для оценки качества ключевых таблиц S- и R-блоков. Приводятся результаты исследований качества алгоритмов формирования ключевых таблиц блоков замены, в том числе алгоритма RC4 и алгоритма с использованием ПСП. Демонстрируется, что оба этих алгоритма применимы и для формирования ключевых таблиц R-блоков.

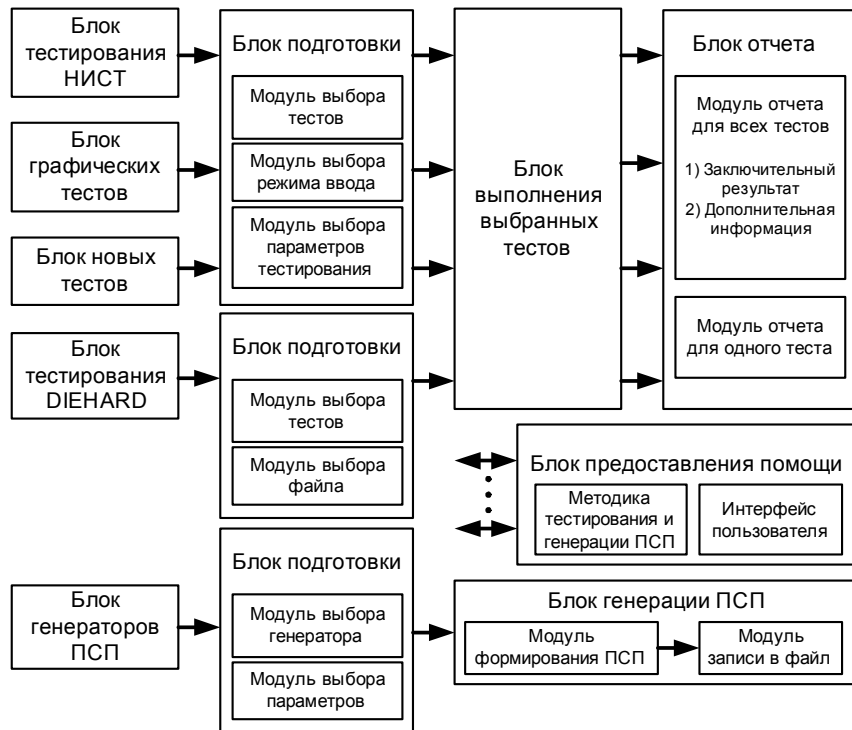


Рис. 7. Структура программного комплекса «PRNG Analyzer»

В заключении отражены основные результаты, полученные в данной диссертационной работе.

1) Проанализированы области использования стохастических алгоритмов защиты программных систем, основанных на использовании генераторов ПСП. Сформулированы требования к качественному генератору ПСП, ориентированному на использование в защищенных программных системах.

2) Разработана классификация генераторов ПСП, в которой в качестве параметров выбраны: тип используемой нелинейной функции; структура генератора; характер использования внешних источников случайности; принцип управления синхронизацией; принцип получения выходной последовательности; принцип использования блоков замены и блоков стохастического преобразования (S- и R-блоков); наличие каскадов.

3) Выделены направления совершенствования блочных алгоритмов формирования ПСП, в том числе разработан новый блочный алгоритм генерации ПСП, основанный на совместном использовании архитектур «Сеть Фейстеля» и «Квадрат». Основным преимуществом алгоритма по сравнению с аналогами является более интенсивное рассеивание и перемешивание информации (рис. 8) за счет использования оригинальной раундовой операции «Перемешивание строк» (MixColumns).

4) Проведено исследование генераторов ПСП, основанных на использовании регистров сдвига со стохастическими сумматорами в цепи обратной связи. Продемонстрирован факт существования таблиц стохастического преобразования, на основе которых появляется возможность строить нелинейные генераторы ПСП длиной $2^Q - 1$, где Q – число элементов памяти генератора.

5) Разработаны новые алгоритмы генерации ПСП на основе стохастических сумматоров, гарантированно обеспечивающие заданную минимальную величину периода формируемой последовательности, равную $2^N - 1$, где N – число регистров генератора.

6) Впервые проведены экспериментальные исследования генераторов ПСП на основе стохастических сумматоров в части опре-

деления ключевых таблиц, обеспечивающих получение нелинейных M-последовательностей.

7) Проведен анализ существующих систем, предназначенных для статистического исследования генераторов ПСП, к которым предъявляются наиболее жесткие требования. Выделены их недостатки, основными из которых являются узкая специализация, недостаточное количество реализованных статистических тестов, отсутствие встроенных генераторов ПСП различных типов, отсутствие возможности оценки качества основных строительных элементов генераторов ПСП.

8) Сформулированы требования к полнофункциональному программному комплексу для оценки качества стохастических алгоритмов. На основе сформулированных требований разработаны структура и состав программного комплекса, в составе которого выделяются программные средства для анализа статистической безопасности генераторов ПСП и программные средства для оценки качества блоков замены и блоков стохастического преобразования.

9) Проведен анализ критериев выбора S-блоков и алгоритмов формирования ключевых таблиц S- и R-блоков. Разработаны статистические тесты для оценки качества ключевых таблиц S- и R-блоков.

10) Проведено исследование статистической безопасности алгоритмов генерации ПСП. Основным выводом по результатам исследований – качество ПСП, формируемых генераторами, основанными на использовании R-блоков, приемлемо для большинства приложений.

Технические характеристики генераторов ПСП на основе стохастических сумматоров (R-блоков):

- эффективная программная реализация: от 6 до 20 инструкций Ассемблера на реализацию любой базовой операции; $N + 2^{n+1}$ ячеек ОП, где N – число регистров генератора ПСП, n – разрядность R-блока;

- возможность получения любого значения предпериода и периода ПСП, в том числе максимально возможного при заданном числе элементов памяти;

- возможность получения нелинейных M-последовательностей;

возможность получения ПСП с гарантированной длиной периода не менее $2^N - 1$, где N – число регистров генератора;

- число различных таблиц стохастического преобразования при заданной разрядности R-блока равно $2^{n-1}!$;

- длина ключа – от 1 до $2^n - 1$ n-разрядных слов.

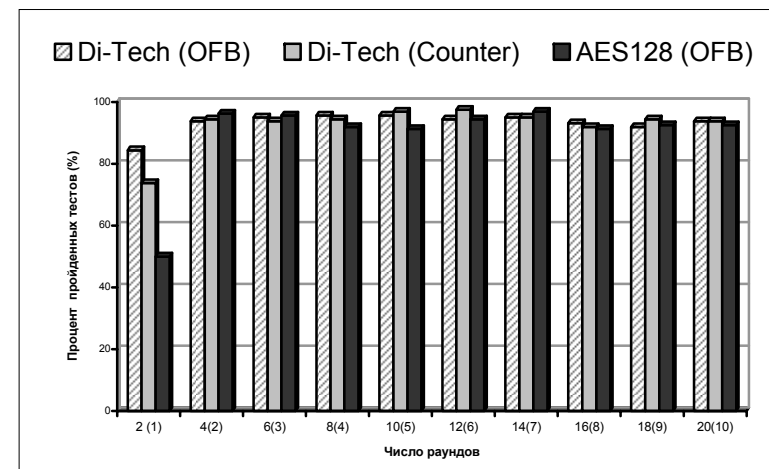


Рис. 8. Результаты статистического исследования генераторов «Di-Tech» и «AES-128»

Теоретические и практические результаты диссертации обеспечивают повышение технической эффективности средств защиты программных систем по сравнению с общеизвестными решениями:

- Разработанные генераторы ПСП на основе R-блоков обеспечивают заданную минимальную величину периода формируемой последовательности, равную $2^N - 1$, где N – число регистров генератора;

- Разработанный программный комплекс оценки качества генераторов ПСП содержит в своем составе средства анализа статистической безопасности S- и R-блоков, ряд новых статистических тестов, встроенные генераторы ПСП, имеет развитую систему помощи.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Иванов М. А., Куликов С. С., Тан Найнг Со. Классификация генераторов псевдослучайных последовательностей. – Научная сессия МИ-ФИ-2005. Сборник научных трудов. Т.12. Компьютерные системы и технологии. М.: МИФИ, 2005, с.153-154.

2. Тан Найнг Со, Тун Мья Аунг, Иванов М.А. Генераторы псевдослучайных последовательностей в задачах защиты информации. Научная сессия МИФИ – 2006. Сборник научных трудов. Т. 12. М.: МИФИ, 2006, с.115-116.

3. Тан Найнг Со. Разработка инструментальных средств оценки качества стохастических алгоритмов обеспечения безопасности информации. – Научная сессия МИФИ-2006. Сборник научных трудов. Т.12. Компьютерные системы и технологии. М.: МИФИ, 2006, с. 117.

4. Тан Найнг Со. Разработка и исследование стохастических алгоритмов генерации псевдослучайных последовательностей. – Научная сессия МИФИ-2007. Сборник научных трудов. Т.12. Компьютерные системы и технологии. М.: МИФИ, 2007, с. 135-136..

5. Тан Найнг Со, Тун Мья Аунг. Комплекс программных средств для исследования стохастических алгоритмов защиты информации. – Материалы 10-ой выставки-конференции «Телекоммуникации и новые информационные технологии в образовании» МИФИ-2006. М.: МИФИ, 2006, с.20.

6. Иванов М.А., Тан Найнг Со, Тун Мья Аунг. Разработка и исследование стохастических алгоритмов защиты информации. Инженерная физика, 2007, № 1, с. 1-5.

7. Иванов М.А., Тан Найнг Со, Тун Мья Аунг, Чугунков И.В. Разработка и исследование стохастических алгоритмов защиты памяти. 62-я научная сессия, посвященная дню Радио. Сборник научных трудов. Москва, 2007.