МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ Государственное автономНОЕ образовательное

учреждение высшего образования

«Новосибирский НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ государственный университет»

(нОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет информационных технологий

Кафедра компьютерных систем

1. Направление подготовки: 09.03.01 Информатика и вычислительная техника
2. Образовательная программа: 09.03.01 Информатика и вычислительная техника

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

|  |
| --- |
| **«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИПТОГРАФИЧЕСКИ СТОЙКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ И ТЕСТОВ ДЛЯ ИХ ПРОВЕРКИ»** |
| утверждена распоряжением проректора по учебной работе №\_\_ от « \_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2018г. |
| скорректирована распоряжением проректора по учебной работе №\_\_ от «\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_2018г. |
| \_Липаткин Артем Евгеньевич\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, группа 14201 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |

(подпись студента)

|  |  |
| --- | --- |
| **«К защите допущен»** | **Руководитель ВКР** |
| Заведующий кафедрой, | д.т.н, г.н.с. ИВТ СО РАН, |
| к.т.н, с.н.с | профессор КафКС ФИТ НГУ |
| Пищик Б.Н./………….. | Рябко Б.Я./………... |
| (ФИО) / (подпись) | (ФИО) / (подпись) |
| «……»………………2018г. | «……»………………2018г. |

Дата защиты: «……»………………2018г.

Новосибирск, 2018г.

Оглавление

[**ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ** 4](#_Toc516041578)

[**ВВЕДЕНИЕ** 5](#_Toc516041579)

[**Изучение тестов** 6](#_Toc516041580)

[**Адаптация тестов** 6](#_Toc516041581)

[**Описание разработанной программы** 8](#_Toc516041582)

[**Отличие от НИСТ реализации** 9](#_Toc516041583)

[**Оптимизация программы** 11](#_Toc516041584)

[**Проверка теста стопки книг** 11](#_Toc516041585)

[**Тестирование генераторов** 12](#_Toc516041586)

[4.3 Тестирование нового генератора 13](#_Toc516041587)

[4.4 Описание таблицы статистических тестов 13](#_Toc516041588)

[**Реализация нового статистического теста** 14](#_Toc516041589)

[**Описание теста** 14](#_Toc516041590)

[**ЗАКЛЮЧЕНИЕ** 17](#_Toc516041591)

[**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ** 18](#_Toc516041592)

[**ПРИЛОЖЕНИЕ** 19](#_Toc516041593)

# **Определения, обозначения и сокращения**

ГПСЧ - генератор псевдослучайных чисел.

НИСТ - Национальный институт стандартов и технологий.

# **Введение**

ГПСЧ находят широкое применение в криптографии (в системах защиты информации), в численных методах (метод Монте-Карло), моделировании и многих других областях.

В наше время существует проблема поиска стойкого ГПСЧ. Стойкость генератора определяется его способностью проходить статистические тесты, основанные на поиске закономерностей в последовательностях псевдослучайных чисел. Цель данной работы - адаптировать набор таких тестов для проверки ГПСЧ на случайность. Новизна состоит в том, что кроме тестов НИСТ будут использован новый тест: стопка книг. Весь этот набор тестов будет проверять не только стандартные генераторы, которые уже существуют в наше время, но и будет проверен новый ГПСЧ.

# **1.1 Изучение тестов**

Были изучены статистические тесты НИСТ, описание которых можно найти в [4]. Суть тестов в выявлении отклонений в последовательности чисел, которые выдаёт ГПСЧ, от случайной последовательности. Описание тестов можно найти в [11].

# **1.2 Адаптация тестов**

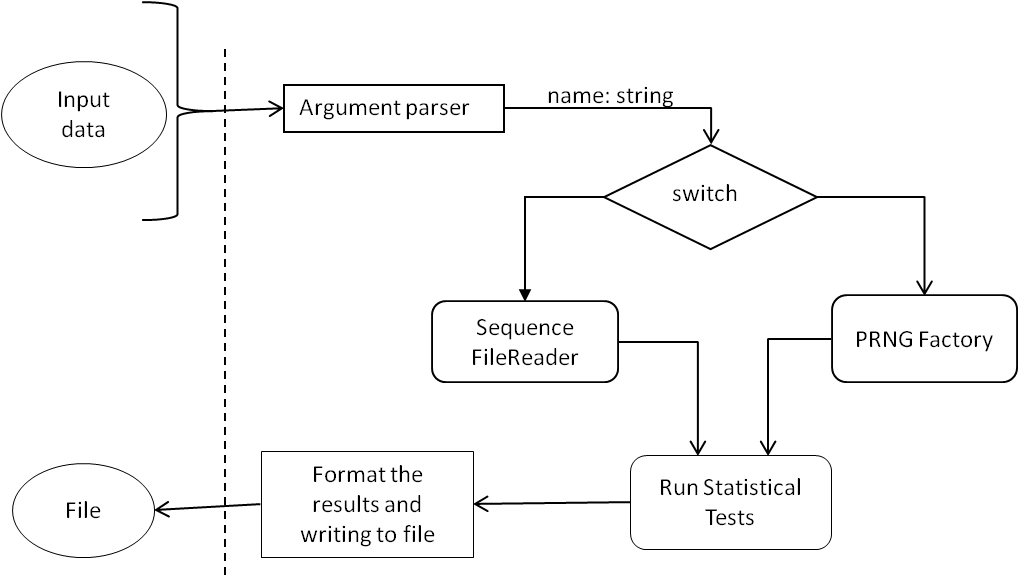
Была скачана программа статистических тестов и её код НИСТ с ресурса [5]. Код программы написан на языке “C”. Программа предоставляет консольный интерфейс. Разобравшись с интерфейсом и кодом программы, я отметил такие недостатки:

1. **Неудобный ввод данных.** Каждый раз приходится заново вводить определённое количество входных параметров. Нельзя за раз передать все параметры. Ввод параметров идёт по порядку, последовательно, один за другим. Вместо этого их [параметры] можно было бы поставить по умолчанию или передавать их в качестве аргументов (пример на ОС Linux: “$ > ./a.out param1=val1 param2=val2 …”).
2. **Единственный способ получения результирующей информации.** Результаты работы программы заносятся в файл в определённом формате в свою поддиректорию. Формат файла читаем и воспринимаем человеком, но не удобен для разработчика, который хочет быстро достать из неё информацию и по-своему её обработать.
3. **Плохо написанная программа с точки зрения расширяемости.** Программа написана на языке “C”. Она трудночитаема и сложно-разбираема. Компоненты программы сильно связаны друг с другом. Например, код, отвечающий за вывод результирующих данных и тестирование последовательностей на случайность, находится в одной и той же функции. Наличие глобальных переменных. Отсутствие директив, необходимых для того, чтобы заголовочный файл не мог повторяться при включении его в больше, чем один, исходный файл.
4. **Проблема распараллеливания.** Проблема, вытекающая из третьего пункта, заключается в том, что нельзя распараллелить программу при том факте, что каждая последовательность тестируется независимо от других, вследствие чего тестирование последовательностей можно распределить на разные потоки.

В виду перечисленных недостатков интерфейса, я принял решение, чтобы разработать собственную программу (уже на языке C++), в которую включил только код с тестами. Как известно, язык программирования С++ является надмножеством языка С (не считая некоторых исключений). Это означает, что код статистических тестов переписывать не нужно, т.е. просто вставить в мою программу.

Так как функции, которые реализуют тесты, занимаются ещё и выводом результирующей информации в файл, пришлось удалить эту часть кода из функций.

В связи с тем, что код функций был изменён (хоть и незначительно), поведение тестов могло измениться (не считаю отсутствие вывода в файл). Соответственно, чтобы не допустить возможных ошибок, был написан ряд модульных тестов для функций, реализующих статистические тесты.

Схема 1.

# **1.3 Описание разработанной программы**

Программа состоит из таких компонентов (Схема 1):

1. Парсер аргументов (Argument Parser).

При запуске ей передаются аргументы:

* 1. статистические тесты, которые нужно запустить (всего 17 тестов, нужно ввести последовательность из 17 нулей и единиц, где единица – тест используется, 0 – тест пропускается);
  2. количество последовательностей, которые будут тестироваться;
  3. название генератора или название файла (формат: “file=type reading=’filename’”, где type reading – {2, 8}, что означает, файл считывается по биту или по байту символа ASCII [‘0’ и ‘1’]);
  4. количество длин последовательностей
  5. перечисление длин (длина последовательности указывается в битах, например «1000» - значит длина последовательности 1000 бит).

1. Чтение последовательности из файла (Sequence FileReader);
2. Фабрика ГПСЧ (PRNG Factory);
3. Запуск статистических тестов (Run Statistical Tests);
4. Форматирование результатов и запись их в файл (Format the results and writing to file).

В конце работы программа выдаёт текстовый файл, в котором содержатся результаты тестирования последовательностей. Первой строкой указываются названия тестов (и с параметром, которым они запускались). Каждая следующая строка выглядит следующим образом: размер последовательности и результат её тестирования по каждому тесту (количество последовательностей, которые не прошли данный тест). Столбцы разделяются табуляцией. Это сделано для того, чтобы можно было легко копировать и вставлять данный файл в табличный документ, например, в программу Microsoft Excel или LibreOffice Calc.

Программа запускается через консоль.

# **1.4 Отличие от НИСТ реализации**

В виду перечисленных недостатков в моей реализации есть хороший API (Application Programming Interface). Каждый тест обёрнут в класс, который наследован от абстрактного класса *IStatisticalTest*. Эти классы перегружают чистую виртуальную функцию *test*. Сделано это для того, чтобы иметь возможность распространять на них общее поведение. Например, хочется замерить, сколько процессорного времени потратил каждый тест. Вместо того, чтобы замерять время над каждым тестом (писать 17 замеров времени, т.е. 17 дублирований кода), можно с помощью виртуального полиморфизма положить каждый объект класса, обёртывающего тест, в контейнер, и в цикле, запуская тест, написать один замер времени возле вызова виртуального метода *test*.

Данный API удобен тем, что если появится потребность написать GUI для данной программы, не нужно перенаправлять ввод/вывод программы, не нужно разбирать файл с результатами программно, чтобы вывести их в пользовательском интерфейсе. Достаточно вызвать функцию *runStatisticalTests*, передав ей в качестве параметров:

1. итераторы на начало и конец последовательности (**\***);
2. ключи, в которых содержится информация о том, какие тесты запускать, а какие пропустить (\*\*);
3. параметры, с которыми нужно запускать тесты (в дополнение можно отметить, что параметры можно передать по умолчанию, вызвав конструктор класса *TestParameters* без аргументов).

(**\***) Стоит заметить, что в моей реализации контейнер и итераторы спрятаны в *typedef*, в котором указан конкретный контейнер *vector<bool>* и соответствующий ему итератор. Плюс данного подхода, что если хочется изменить тип контейнер, достаточно поменять тип в одном месте. Минус такого подхода: всю программу придётся перекомпилировать, что занимает в районе нескольких минут, так как почти все компоненты программы зависят от типа контейнера.

Функция возвращает массив элементов типа перечисления, который имеет три значения: SUCCESS – тест завершился успешно, последовательность, признана случайной; FAILURE – тест завершился, последовательность признана неслучайной, CANCELLED – тест прервался, в связи с определённым обстоятельствами (неправильный переданный аргумент, последовательность не удовлетворяет критерию, поэтому тест не может дать ответ, случайна она или нет и т.д.). Элементы в массиве располагаются в порядке вызова тестов. Чтобы узнать, какой элемент принадлежит тесты, нужно вызвать функцию *getStatisticalTestNames*, с переданным ему ключом (\*\*) и размером последовательности. Функция возвращает массив строк, в котором хранятся названия статистических тестов. Индекс в массиве строк соответствует индексу в массиве результата запуска тестов. Соответственно, получаем всю необходимую информацию о результатах тестирования одной последовательности: название теста и результат (последовательность случайна, не случайна или тест отменён).

Также, чтобы не писать свою реализацию считывания из файла битовых последовательностей в различных форматах: через биты или ASCII символы - можно воспользоваться готовыми функциями *readSequenceByBitFromFile* и *readSequenceByByteFromFile*, соответственно.

# **1.5 Оптимизация программы**

Тестирование ГПСЧ с помощью предыдущей версии программы занимало много времени для длин последовательностей больше, чем 100 Кбит. Например, время, затрачиваемое на тестирование 100 последовательностей с длиной в 100 Кбит, занимало примерно 10 минут.

Для ускорения работы программы была использована библиотека OpenMP [2]. Так как в реализованном алгоритме последовательности псевдослучайных чисел тестируются независимо друг от друга, с помощью директив, предоставляемых библиотекой, работа программы в этой части стала параллельной. Т.е. в каждый момент времени работы программы N последовательностей тестируются в N различных потоках, и, если мы имеем N исполнительных устройств, то тестируются параллельно (параллелизм в пространстве). Время работы уменьшается пропорционально количеству задействованных исполнительных устройств.

# **2. Проверка теста стопки книг**

Каждый статистический тест должен уметь распознавать случайные последовательности, т.е. не совершать такого рода ошибку: утверждать, что последовательность не случайна, когда она признана случайной. Последовательность считается случайной, если нам известно, что она является результатом какого-либо случайного процесса, или другие статистические тесты, которые мы признали достоверными, выдают результат, что последовательность случайна.

Тест стопка книг – новый статистический тест, требующий проверки на случайных последовательностях. Описание теста можно найти в репозитории на Github [1]. В качестве случайной последовательности было выбрано число Пи. Был скачан 1Гб числа Пи с ресурса [8]. Сначала было решено протестировать число Пи на случайность тестами НИСТ (так как они признаны верными). Результаты тестирования представлены в таблице 1.

Максимальное количество тестов, которое не прошло число Пи, равно 9. 9 тестов из 100 (тест *NonOverlappingTemplateMatchings\_7*) – достаточно хороший результат, по сравнению с теми, которые показывают стандартные ГПСЧ.

Теперь взглянем на результаты теста стопки книг. Тест запускался с разными параметрами: первый параметр – размерность стопки, второй – размер верхней части стопки. По результатам видно, что тест показывает примерное такие же результаты. Максимальное количество последовательностей, которые не прошли тест, равно 8. Вследствие этого можно сказать, что тест распознаёт случайные последовательности и его можно применять для тестирования ГПСЧ.

# **3. Тестирование генераторов**

Чтобы узнать границы применимости статистических тестов, было принято решение проверить их на ГПСЧ из стандартной библиотеки С++:

1. knuth\_b
2. rand – линейно-конгруэнтный.
3. minstd\_rand – линейно-конгруэнтный.
4. mt19937\_64 – вихрь Мерсенна.
5. ranlux48
6. random\_device – аппаратный ГПСЧ.

Генераторы тестировались на длинах: 10, 100, 500, 1000, 10000 Кбит (1024 бит). На длинах, меньших 10000 Кбит, проводились эксперименты из 100 попыток, т.е. тестировались 100 последовательностей по каждой длине. На длине 10000 Кбит – 20 попыток. Приведён пример результатов тестирования knuth\_b таблице 5.

Для длин, меньших 10000 Кбит, на генераторах: knuth\_b, mt19937\_64, ranlux48, random\_device – были выявлены максимальное количество не пройденных тестов: 10, 12, 12, 10 – количество последовательностей, которые не прошли определенный статистический тест, соответственно. Относительно уровня значимости 0,95 необходимо принять решение о том, что данные ГПСЧ выдают не случайные последовательности.

Однако, изучив результаты тестирования последовательности числа Пи (которая является случайной) и сравнив их с результатами данных ГПСЧ, можно заметить, что максимальное количество провальных попыток разниться на несколько раз (в пределах 3). У числа Пи - 9 провальных попыток, у ГПСЧ (например mt19937\_64) - 12. Т.е. следует сделать вывод, что сложно принимать гипотезу о не случайности исследованных ГПСЧ при условии, что случайная последовательность проходит тесты ненамного лучше.

## 3.1 Тестирование нового генератора

Был протестирован новый генератор, основанный на двуликом процессе. Генератор был разработан студентом студенту 4 курса факультета информационных технологий Гаразовским Максимом Павловичем.

## 3.2 Описание таблицы статистических тестов

В таблицах 2, 3, 4 представлены данные по тестированию ГПСЧ, основанного на двуликом процессе [2][3]. В строках указаны названия тестов и через нижнее подчёркивание параметры, с которыми они запускались:

1. BookStackTest\_\_dim\_\_up – статистический тест «стопка книг», описание которого можно найти в [4]. \_dim – длина двоичного слова в «стопке» таких слов. \_up – размер верхней части стопки.
2. Параметры остальных тестов можно найти в документации [1][5].

В столбцах указаны длины последовательностей, которые были переданы в тесты. Количество попыток на каждый тест равняется 100 штук. Уровень значимости . ГПСЧ запускался с разными значениями параметра вероятности: 0.1, 0.01, 0.001. Ячейки со значений -1 означают, что при данных параметрах тест запускать бессмысленно. По результатам выявлено, что ГПСЧ не проходит некоторые тесты, 11 из 100 попыток. При данном уровне значимости (0.95) эти результаты дискредитирующие. Т.е. ожидалось увидеть максимум 5 провальных попыток из 100. Но по сравнению с другими генераторами, проверенными на этих тестах с такими же длинами, например:

1. Вихрь Мерсенна [12] – 12 не пройденных попыток из 100,
2. ГПСЧ Кнута [13] – 10 из 100,
3. Ranlux48 [14] – 12 из 100,

- можно сделать вывод, что ГПСЧ, основанный на двуликом процессе, может сравниваться по статистическим свойствам с хорошими проверенными ГПСЧ.

# **4. Реализация нового статистического теста**

Тест «Order Test», описанный в публикации [5] (раздел 3.2 «Order Test»), является модификацией теста «стопки книг» ([5] раздел 3.1 «The Book Stack Test»). Тест был выбран в соответствие с быстротой его работы.

# **4.1 Описание теста**

На вход тесту подаётся последовательность из символов алфавита *А*. Есть отсортированный массив («стопка»), который хранит частоту (счётчик) встречаемости символа в последовательности до момента *t* (позиция, до которой включительно последовательность была просмотрена). Элементы в массиве отсортированы таким образом, чтобы в начале массива (в вершине стопки) находились те символы, которые встречались в последовательности чаще других. Каждая итерация алгоритма описывается следующим образом: достаётся следующий символ из последовательности, потом ищется в стопке. После нахождения данного элемента, счётчик текущего символа увеличивается на единицу. Далее стопка сортируется (в соответствие со свойством).

**4.2 Реализация**

Класс, который реализует тест, выделяет память под: контейнер, который реализует «стопку» (хранит частоту встречаемости символа в последовательности), соответствие в виде массива (ключ: символ алфавита *А*; значение: индекс элемента в контейнере – для быстрого нахождения элемента в стопке), массив границ. Массив границ представляет собой множество элементов, каждый из которых является границей конкретного *ряда* элементов массива частот (определение ряда даётся дальше).

Элементы в стопке упорядочены по частоте встречаемости, поэтому наша стопка представляет собой совокупность *рядов*, подряд идущих элементов с одинаковой частотой. Достаточно хранить «ссылку» (индекс) на последний элемент в этом ряду, чтобы быстро получить все элементы этого *ряда*. Назовём эту «ссылку» *границей* – индекс в стопке, указывающий на конец этого *ряда*. Набор таких границ будем хранить в хэш-таблице. Хэш-таблица нужна для получения границы по ключу (частота ряда) за константное время.

Допустим, вытаскиваем очередной символ из последовательности. С помощью соответствия достаём индекс элемента в стопке. Увеличиваем счётчик (частоту) данного символа на единицу. Теперь данный элемент стопки должен переместиться в новый или уже существующий ряд с новой частотой (которая на единицу больше, чем предыдущая частота текущего элемента). С помощью хэш-таблицы достаём по ключу (частоте) индекс, указывающий на следующий после последнего элемента ряда элемент. Меняем эти два элемента местами, увеличивая индекс границы на единицу (т.е. сдвигая нашу границу, тем самым расширяя ряд новой частоты). Если же данной границы нет, то создаём новую границу, добавив её в хэш-таблицу. Текущий элемент меняем с верхним элементом стопки. Новую границу ставим на соответствующее место.

Во время работы теста могут появляться границы, совпадающие с другими границами по индексу, на который они ссылаются. Т.е. появляться пустые ряды. Чтобы не засорять хэш-таблицу, их нужно удалять. Проверка на удаление происходит каждый раз, как вытащенный символ попадает в новый ряд с новой частотой, тем самым опустошая свой предыдущий ряд. С помощью std::map (хэш-таблицы из стандартной библиотеки С++) удаление можно сделать за константное время [4].

**4.3 Сложность работы**

Сложность алгоритма: O(N \* log(N)) – худший случай. Среднее время: O(N). Каждая итерация цикла выполняется в среднем за константное время.

**4.4 Принятие решения**

На вход тесту подаётся размер верхней стопки. Программа считает, сколько символ побывал в этой верхней части стопки. И считает статистику хи-квадрат для этих данных. В соответствие с таблицей распределения хи-квадрат по статистике достаётся вероятность, которая сравнивается с 0,95. Если вероятность больше данного числа, то принимается гипотеза о не случайности последовательности. Иначе последовательность случайна.

**4.5 Дальнейшие исследования**

Данный тест требует тестирования на последовательностях случайных чисел для проверки его корректности (что тест не дискредитирует случайные последовательности).

# **Заключение**

В результате данного исследования была разработана параллельная программа для тестирования ГПСЧ и последовательностей чисел. С помощью этой программы были исследованы ГПСЧ из стандартной библиотеки С++, ГПСЧ, предлагаемые НИСТ, и новый ГПСЧ, основанный на двуликом процессе.

# **Список использованных источников и литературы**

1. Ryabko B. Ya., Monarev V. A. Book Stack Operation Manual [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/sashasasha-1987/book-stack>
2. Описание работы программы НИСТ, выдающей случайные числа [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/programs-projects/nist-randomness-beacon>
3. Случайные числа НИСТ. Код программы на Github [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/grempe/nist-randomness-beacon>
4. AndrewRukhin et. al. A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications // NIST Special Publication 800-22 [Электронный ресурс]. – URL: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-22r1a.pdf>
5. Случайные числа НИСТ [Электронный ресурс]. – URL: https://sourceforge.net/projects/randomanalysis/
6. Описание статистического теста Order Test [Электронный ресурс]. – URL: <http://boris.ryabko.net/published.pdf>
7. Лекция OpenMP [Электронный ресурс]. – URL: http://ssd.sscc.ru/sites/default/files/content/attach/343/lecture\_openmp\_2015.pdf
8. Ресурс загрузки большого числа Пи [Электронный ресурс]. – URL: http://pi2e.ch/blog/2017/03/10/pi-digits-download/
9. Описание функции удаления из класс std::map C++ [Электронный ресурс]. – URL: <http://en.cppreference.com/w/cpp/container/map/erase>
10. Определение функции ошибок [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Функция\_ошибок
11. Описание статистических тестов НИСТ [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Статистические_тесты_NIST>
12. Вихрь Мерсенна [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Вихрь_Мерсенна>
13. Генератор псевдослучайных чисел Кнута [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cplusplus.com/reference/random/knuth_b/>
14. Генератор псевдослучайных чисел Ranlux48 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cplusplus.com/reference/random/ranlux48/>

# **Приложение**

Таблица 1 - Тестирование числа Пи. Уровень значимости 0.95.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Название тестов \ длина последовательности (количество последовательностей, которые не прошли тесты) | 100 Кбит | 1000 Кбит |
| BookStackTest\_8dim\_16up | 3 | 7 |
| BookStackTest\_16dim\_16up | 5 | 5 |
| BookStackTest\_32dim\_16up | - | 0 |
| BookStackTest\_8dim\_16up | 3 | 7 |
| BookStackTest\_16dim\_256up | 3 | 7 |
| BookStackTest\_32dim\_65536up | - | 8 |
| BookStackTest\_8dim\_128up | 5 | 3 |
| BookStackTest\_16dim\_32768up | 2 | 4 |
| Frequency | 6 | 4 |
| BlockFrequency\_2 | 1 | 0 |
| BlockFrequency\_16 | 6 | 5 |
| BlockFrequency\_32 | 3 | 4 |
| BlockFrequency\_128 | 4 | 6 |
| Runs | 1 | 6 |
| LongestRunOfOnes | 7 | 5 |
| Rank | 4 | 2 |
| DiscreteFourierTransform | 8 | 5 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_3 | 0 | 0 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_5 | 8 | 9 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_7 | - | - |
| OverlappingTemplateMatchings\_2 | 0 | 0 |
| OverlappingTemplateMatchings\_6 | 4 | 4 |
| OverlappingTemplateMatchings\_12 | 7 | 7 |
| Universal | 0 | 3 |
| Serial\_3\_1 | 6 | 5 |
| Serial\_3\_2 | 8 | 3 |
| Serial\_5\_1 | 4 | 5 |
| Serial\_5\_2 | 7 | 5 |
| Serial\_11\_1 | 2 | 4 |
| Serial\_11\_2 | 5 | 6 |
| ApproximateEntropy\_1 | 2 | 8 |
| ApproximateEntropy\_4 | 6 | 5 |
| ApproximateEntropy\_8 | 4 | 2 |
| CumulativeSums\_1 | 6 | 4 |
| CumulativeSums\_2 | 8 | 5 |
| RandomExcursions | 1 | 7 |
| RandomExcursionsVariant | 0 | 2 |

Таблица 2 - Тестирования ГПСЧ, основанного на двуликом процессе. Параметр ГПСЧ: 0.1.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Длина последовательности | | | |
| Наименование тестов | 103 | 104 | 105 | 106 |
| BookStackTest\_8\_dim\_16\_up | 5 | 8 | 5 | 5 |
| BookStackTest\_16\_dim\_16\_up | -1 | -1 | -1 | 9 |
| BookStackTest\_8\_dim\_16\_up | 5 | 8 | 5 | 5 |
| BookStackTest\_16\_dim\_256\_up | -1 | -1 | -1 | 2 |
| BookStackTest\_8\_dim\_128\_up | 10 | 4 | 3 | 5 |
| Frequency | 7 | 7 | 5 | 10 |
| BlockFrequency\_2 | 1 | 1 | 2 | 0 |
| BlockFrequency\_10 | 6 | 7 | 5 | 2 |
| Runs | 7 | 8 | 4 | 3 |
| LongestRunOfOnes | 5 | 5 | 6 | 4 |
| Rank | -1 | 1 | 3 | 6 |
| DiscreteFourierTransform | 8 | 3 | 7 | 11 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OverlappingTemplateMatchings\_2 | -1 | -1 | -1 | 0 |
| OverlappingTemplateMatchings\_6 | -1 | -1 | -1 | 3 |
| OverlappingTemplateMatchings\_12 | -1 | -1 | -1 | 4 |
| Universal | -1 | -1 | -1 | 9 |
| Serial\_2\_1 | 10 | 8 | 3 | 3 |
| Serial\_2\_2 | 7 | 7 | 4 | 3 |
| Serial\_3\_1 | 7 | 5 | 2 | 4 |
| Serial\_3\_2 | 6 | 2 | 5 | 4 |
| Serial\_5\_1 | 7 | 3 | 6 | 7 |
| Serial\_5\_2 | 3 | 3 | 8 | 9 |
| Serial\_11\_1 | -1 | 3 | 7 | 5 |
| Serial\_11\_2 | -1 | 3 | 7 | 11 |
| ApproximateEntropy\_1 | 10 | 7 | 3 | 3 |
| ApproximateEntropy\_2 | 7 | 5 | 3 | 4 |
| ApproximateEntropy\_4 | 7 | 3 | 6 | 7 |
| ApproximateEntropy\_8 | -1 | 7 | 7 | 6 |
| CumulativeSums\_1 | 5 | 8 | 4 | 8 |
| CumulativeSums\_2 | 7 | 6 | 6 | 9 |
| RandomExcursions | -1 | -1 | 0 | 0 |
| RandomExcursionsVariant | -1 | -1 | 0 | 0 |

Таблица 3 - Тестирования ГПСЧ, основанного на двуликом процессе. Параметр ГПСЧ: 0.01.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Длина последовательности | | | |
| Наименование тестов | 103 | 104 | 105 | 106 |
| BookStackTest\_8\_dim\_16\_up | 3 | 9 | 7 | 3 |
| BookStackTest\_16\_dim\_16\_up | -1 | -1 | -1 | 4 |
| BookStackTest\_8\_dim\_16\_up | 3 | 9 | 7 | 3 |
| BookStackTest\_16\_dim\_256\_up | -1 | -1 | -1 | 4 |
| BookStackTest\_8\_dim\_128\_up | 1 | 4 | 4 | 4 |
| BookStackTest\_16\_dim\_32768\_up | -1 | -1 | -1 | 6 |
| Frequency | 10 | 4 | 7 | 2 |
| BlockFrequency\_2 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| BlockFrequency\_10 | 5 | 7 | 7 | 4 |
| Runs | 3 | 5 | 4 | 4 |
| LongestRunOfOnes | 8 | 3 | 2 | 2 |
| Rank | -1 | 7 | 5 | 5 |
| DiscreteFourierTransform | 4 | 2 | 8 | 4 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OverlappingTemplateMatchings\_2 | -1 | -1 | -1 | 0 |
| OverlappingTemplateMatchings\_6 | -1 | -1 | -1 | 1 |
| OverlappingTemplateMatchings\_12 | -1 | -1 | -1 | 2 |
| Universal | -1 | -1 | -1 | 6 |
| Serial\_2\_1 | 9 | 4 | 3 | 2 |
| Serial\_2\_2 | 5 | 6 | 5 | 4 |
| Serial\_3\_1 | 5 | 4 | 6 | 3 |
| Serial\_3\_2 | 8 | 3 | 6 | 9 |
| Serial\_5\_1 | 4 | 1 | 9 | 8 |
| Serial\_5\_2 | 5 | 2 | 6 | 7 |
| Serial\_11\_1 | -1 | 4 | 5 | 2 |
| Serial\_11\_2 | -1 | 8 | 3 | 3 |
| ApproximateEntropy\_1 | 9 | 4 | 3 | 2 |
| ApproximateEntropy\_2 | 4 | 4 | 6 | 3 |
| ApproximateEntropy\_4 | 7 | 3 | 9 | 8 |
| ApproximateEntropy\_8 | -1 | 7 | 9 | 3 |
| CumulativeSums\_1 | 10 | 4 | 3 | 3 |
| CumulativeSums\_2 | 10 | 4 | 3 | 3 |
| RandomExcursions | -1 | -1 | 0 | 0 |
| RandomExcursionsVariant | -1 | -1 | 0 | 0 |

Таблица 4 - Тестирования ГПСЧ, основанного на двуликом процессе. Параметр ГПСЧ: 0.001.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Длина последовательности | | | |
| Наименование тестов | 103 | 104 | 105 | 106 |
| BookStackTest\_8\_dim\_16\_up | 5 | 4 | 1 | 7 |
| BookStackTest\_16\_dim\_16\_up | -1 | -1 | -1 | 2 |
| BookStackTest\_8\_dim\_16\_up | 5 | 4 | 1 | 7 |
| BookStackTest\_16\_dim\_256\_up | -1 | -1 | -1 | 4 |
| BookStackTest\_8\_dim\_128\_up | 5 | 8 | 5 | 2 |
| BookStackTest\_16\_dim\_32768\_up | -1 | -1 | -1 | 6 |
| Frequency | 1 | 2 | 6 | 5 |
| BlockFrequency\_2 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| BlockFrequency\_10 | 1 | 6 | 2 | 8 |
| Runs | 3 | 5 | 5 | 8 |
| LongestRunOfOnes | 4 | 7 | 6 | 2 |
| Rank | -1 | 4 | 3 | 10 |
| DiscreteFourierTransform | 9 | 8 | 6 | 8 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OverlappingTemplateMatchings\_2 | -1 | -1 | -1 | 0 |
| OverlappingTemplateMatchings\_6 | -1 | -1 | -1 | 2 |
| OverlappingTemplateMatchings\_12 | -1 | -1 | -1 | 5 |
| Universal | -1 | -1 | -1 | 4 |
| Serial\_2\_1 | 3 | 4 | 2 | 8 |
| Serial\_2\_2 | 3 | 5 | 5 | 8 |
| Serial\_3\_1 | 4 | 8 | 4 | 8 |
| Serial\_3\_2 | 4 | 8 | 5 | 7 |
| Serial\_5\_1 | 2 | 4 | 4 | 6 |
| Serial\_5\_2 | 2 | 5 | 5 | 4 |
| Serial\_11\_1 | -1 | 5 | 5 | 10 |
| Serial\_11\_2 | -1 | 6 | 4 | 8 |
| ApproximateEntropy\_1 | 3 | 4 | 2 | 8 |
| ApproximateEntropy\_2 | 4 | 8 | 3 | 8 |
| ApproximateEntropy\_4 | 3 | 5 | 5 | 6 |
| ApproximateEntropy\_8 | -1 | 7 | 5 | 3 |
| CumulativeSums\_1 | 1 | 3 | 5 | 3 |
| CumulativeSums\_2 | 0 | 1 | 4 | 5 |
| RandomExcursions | -1 | -1 | 0 | 0 |
| RandomExcursionsVariant | -1 | -1 | 0 | 0 |

Таблица 5 - Тестирования ГПСЧ Кнута (knuth\_b).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Длина последовательности | | | | |
| Наименование тестов | 104 | 105 | 5 \* 105 | 106 | 107 |
| BookStackTest\_8dim\_16up | 4 | 10 | 9 | 5 | 2 |
| BookStackTest\_16dim\_16up |  | 3 | 7 | 4 | 3 |
| BookStackTest\_32dim\_16up |  |  |  | 0 | 0 |
| BookStackTest\_8dim\_16up | 4 | 10 | 9 | 5 | 2 |
| BookStackTest\_16dim\_256up |  | 8 | 9 | 9 | 1 |
| BookStackTest\_32dim\_65536up |  |  |  | 9 | 0 |
| BookStackTest\_8dim\_128up | 4 | 8 | 4 | 8 | 0 |
| BookStackTest\_16dim\_32768up |  | 7 | 4 | 4 | 0 |
| Frequency | 5 | 2 | 2 | 6 | 1 |
| BlockFrequency\_2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| BlockFrequency\_16 | 2 | 3 | 4 | 10 | 2 |
| BlockFrequency\_32 | 3 | 3 | 3 | 5 | 0 |
| BlockFrequency\_128 | 5 | 2 | 5 | 7 | 0 |
| Runs | 2 | 4 | 4 | 2 | 0 |
| LongestRunOfOnes | 3 | 2 | 3 | 6 | 1 |
| Rank | 4 | 9 | 4 | 5 | 1 |
| DiscreteFourierTransform | 7 | 4 | 6 | 6 | 3 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NonOverlappingTemplateMatchings\_7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OverlappingTemplateMatchings\_2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OverlappingTemplateMatchings\_6 | 7 | 4 | 2 | 2 | 13 |
| OverlappingTemplateMatchings\_12 |  | 2 | 4 | 3 | 1 |
| Universal |  |  | 7 | 3 | 1 |
| Serial\_3\_1 | 8 | 3 | 2 | 5 | 1 |
| Serial\_3\_2 | 7 | 3 | 4 | 6 | 1 |
| Serial\_5\_1 | 7 | 3 | 7 | 5 | 0 |
| Serial\_5\_2 | 7 | 0 | 5 | 4 | 0 |
| Serial\_11\_1 |  | 7 | 5 | 5 | 1 |
| Serial\_11\_2 |  | 9 | 5 | 5 | 1 |
| ApproximateEntropy\_1 | 6 | 4 | 4 | 5 | 1 |
| ApproximateEntropy\_4 | 7 | 3 | 7 | 5 | 0 |
| ApproximateEntropy\_8 | 5 | 4 | 6 | 7 | 2 |
| CumulativeSums\_1 | 8 | 2 | 4 | 8 | 1 |
| CumulativeSums\_2 | 7 | 2 | 1 | 7 | 2 |
| RandomExcursions |  |  |  | 0 | 0 |
| RandomExcursionsVariant |  |  |  | 0 | 0 |