



РАЗРАБОТКА И ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АППАРАТНОГО ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ В СОСТАВЕ ЗАЩИЩЕННЫХ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ

DEVELOPING AND USING THE HARDWARE RANDOM NUMBER GENERATOR IN THE STRUCTURE OF SECURE SYSTEMS ON CHIP

УДК 621.373.5

ТИМОШИН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

stimoshin@niime.ru

НУЙКИН АНДРЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

anuykin@niime.ru

РОЛДУГИНА ЖАННА ИГОРЕВНА

zoldugina@niime.ru

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград,

1-й Западный проезд, 12, стр. 1

TIMOSHIN SERGEY A.

stimoshin@niime.ru

NUYKIN ANDREY V.

anuykin@niime.ru

ROLDUGINA ZHANNA I.

zoldugina@niime.ru

Molecular Electronics Research Institute JSC

12/1 1st Zapadny Lane, Zelenograd,

Moscow, 124460, Russia

The article describes the features of designing and using a hardware random number generator as a part of secure systems on a chip. Generator's block diagram is presented and the designed random number generator's working principle is described. A comparative analysis of different methods of correction of the generated random sequence is presented and a research is done into their impact on the statistical properties of a random sequence obtained with the developed generator.

Keywords. random number generator; data compression; Von Neumann correction; statistical tests; encryption.

В настоящее время генераторы случайных чисел широко используются в микроэлектронных устройствах для различных задач, среди которых создание криптографических ключей для защищенной передачи данных. В связи с тем, что они выполняют такую важную функцию в устройствах, необходимо, чтобы элементы реализуемой генератором последовательности чисел были независимы друг от друга, а также имели равномерное распределение.

Данные условия наиболее точно выполняются для аппаратных генераторов случайных чисел. На сегодняшний день одними из самых защищенных интегральных микросхем, в составе которых используется аппаратный генератор случайных чисел, являются платежные и идентификационные микропроцессорные смарт-карты со встроенной энергонезависимой памятью [1, 2, 3].

Работа аппаратных генераторов случайных чисел основывается на измерении параметров физического процесса, которые хаотически изменяются во времени. Процесс может описываться либо классической, либо квантовой физикой. Вероятностная природа квантовой физики наиболее подходит в качестве основы для создания подобного прибора. Однако данные системы в настоящее время подходят лишь для тех областей, где истинность случайных чисел важна настолько, что компенсирует все материальные и интеллектуальные затраты на производство данных устройств [4].

В тех случаях, когда требуется широкое практическое применение, обращаются к классической физике с макроскопическими системами. Среди них для генерации случайных чисел

наблюдаются такие эффекты: отслеживание тепловых шумов в резисторе, фазовое дрожание в кольцевых генераторах и т.д. Подобные устройства более просты в реализации и не требуют особой технологии, однако некоторые факторы, например, температура, могут повлиять на качество сгенерированной последовательности.

Разработанный блок генератора случайных чисел предназначен для формирования случайной последовательности логических состояний на выходе блока. Требования по напряжению питания соответствуют требованиям, предъявляемым цифровыми блоками. Ток потребления пропорционален тактовой частоте (3,5 мкА при 10 МГц). Предельная тактовая частота 100 МГц. На рис. 1 представлено символическое обозначение разработанного блока генератора случайных чисел.

С выхода генератора `out_rndgen` снимается последовательность случайных чисел. С помощью входа `sel_rndgen` осуществляется выбор схемы генератора случайных чисел, вход `en_rndgen` представляет собой вход разрешения работы генератора случайных чисел, на вход `clk_rndgen` поступает тактовый сигнал. На рис. 2 представлена временная диаграмма работы генератора случайных чисел, на которой продемонстрирована работа генератора при включенном и отключенном разрешающем сигнале с входа `en_rndgen` с временем включения схемы t_0 .

Ток потребления данного блока генератора случайных чисел составляет не более 300 мкА, а время включения составляет не более 1 мкс. В рамках работы была произведена оптимизация схемы блока генератора случайных чисел по току потребления и занимаемой площади.

В лаборатории отдела разработки интегральных схем АО «НИИМЭ» было проведено исследование генераторов случайной последовательности в составе экспериментальных образцов и в составе конечных изделий. Данное исследование заключалось в определении степени работоспособности генераторов случайной последовательности и сравнении работоспособности исходного и оптимизированного генератора случайной последовательности.

Для проведения измерений использовалось следующее оборудование: источник питания — GwInstek GPD-73303S, генератор/анализатор сигналов — Lecroy ArbStudio 1104, плата для прототипирования на основе ПЛИС Xilinx Virtex-4.

При помощи генератора/анализатора сигналов — Lecroy ArbStudio 1104 были собраны последовательности данных с выхода генератора случайной последовательности длиной 62500 байт.

Существенной проблемой аппаратных генераторов случайных чисел является наличие отклонений и корреляций в сгенерированной последовательности. Сами процессы могут быть случайными, но проблемы могут возникнуть в процессе измерений. В связи с этим возникает необходимость в коррекции полученной последовательности случайных чисел для повышения энтропии, при которой вероятности появления логического нуля и единицы приблизительно равны. Существует большое количество методов коррекции для улучшения качества последовательности. В работе применялась коррекция с помощью преобразования фон Неймана. Принцип данного преобразования состоит в разбиении исходной последовательности на пары бит с последующим выбором только тех пар, где соседние значения различны, пары с одинаковыми значениями отбрасываются. Для выбранных пар в выходную последовательность назначаются конечные значения. На рис. 3 приведен пример такого преобразования. В данном примере паре «10» назначается значение «1», а для пары «01» назначается значение «0», пары «00» и «11» удаляются из последовательности.

По итогам преобразования фон Неймана последовательность значительно сокращается, а ее статистические свойства

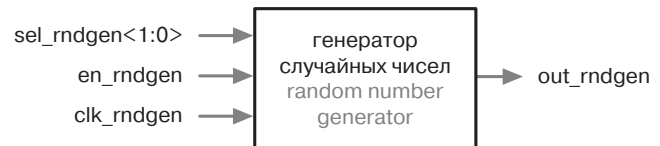


Рис. 1. Символьное обозначение блока генератора случайных чисел
Fig. 1. Symbolic designation of random number generator

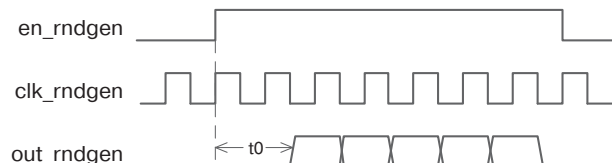


Рис. 2. Временная диаграмма работы генератора случайных чисел
Fig. 2. Timing diagram of random number generator operation

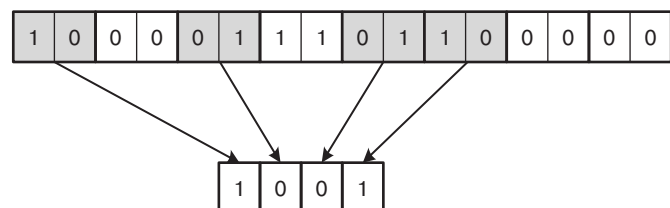


Рис. 3. Пример преобразования фон Неймана
Fig. 3. Example of von Neumann correction

приближаются к свойствам, присущим случайным последовательностям.

Для экспресс-оценки качества данных последовательность была исследована по нескольким параметрам. Одним из наиболее показательных критериев случайных последовательностей является вероятность появления логических «0» и «1» в последовательности, которая в идеальном случае равна 50%. Следующим критерием являлась степень сокращения длины последовательности

Today random number generators are widely used in microelectronic devices for various tasks, including the creation of cryptographic keys for secure data transmission. Due to their important function in devices, it is necessary for the elements of number sequence implemented by the generator to be independent of each other and have a uniform distribution.

These conditions are most accurately fulfilled for hardware random number generators. As of today one of the most secure integrated circuits using a hardware random number generator are payment and ID microprocessor-based smart cards with integrated non-volatile memory [1,2,3].

The operation of hardware random number generators is based on the measurement of physical process parameters that are randomly changing in time. The process can be described by classical or quantum physics. The probabilistic nature of quantum physics is more suitable as the basis for creating

a similar device. However, these systems are currently suitable only for those areas where the reliability of random numbers is important to such an extent that it compensates for all material and intellectual efforts for these devices production. [4]

In cases where you want a wide practical application, the most suitable method is classical physics of macroscopic systems. Among these, such effects as tracking thermal noise in the resistor, the phase jitter in ring oscillators and others allow one to generate random number sequences. Such devices are simpler to be implemented and do not require special technology, but some factors, e.g. temperature, can affect the quality of the generated sequence.

The designed random number generator is a block that generates a random sequence of logic states at the unit output. Requirements for supply voltage correspond to the requirement voltage of the digital blocks. The current consumption is proportional to clock

frequency (3.5μA at 10MHz). Limit clock frequency is 100MHz. Fig. 1 shows the symbolic designation of the developed block of the random number generator.

The generator output is out_rndgen. The input sel_rndgen is the pin for selecting random number generator circuit, input en_rndgen is the enable pin of the generator of random numbers, the input clk_rndgen is the pin for the clock signal. Fig. 2 shows the time diagram of the random number generator operation that illustrates the operation of the generator when signal from input en_rndgen is on or off. The switch-on time of the circuit is t0.

The current consumption of this block of the random number generator is less than 300mA, and the switching time is less than 1μs. This work deals with optimization of the circuit of the random number generator by current consumption and occupied area.

A study of generators of the random sequence in experimental samples and the

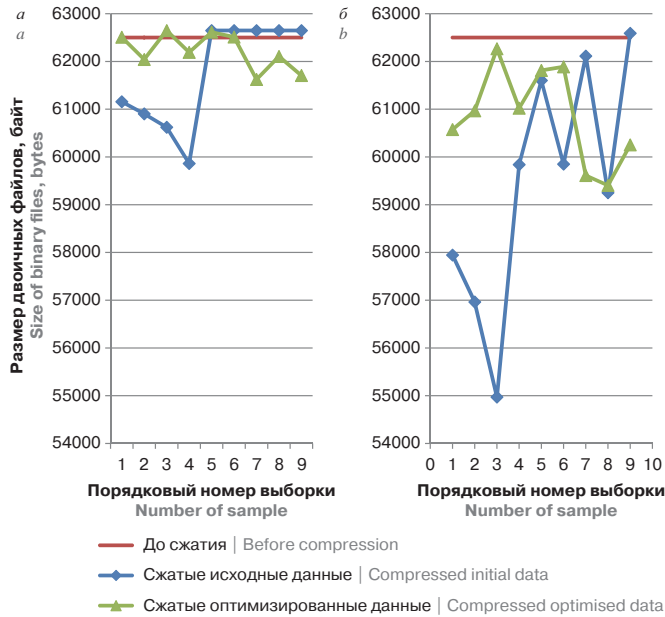


Рис. 4. Размер исходных двоичных файлов: а) при включенном генераторе тактовой частоты; б) при отключенном генераторе тактовой частоты

Fig. 4. The size of original files: а) when the clock generator is turned on; б) when the clock generator is turned off

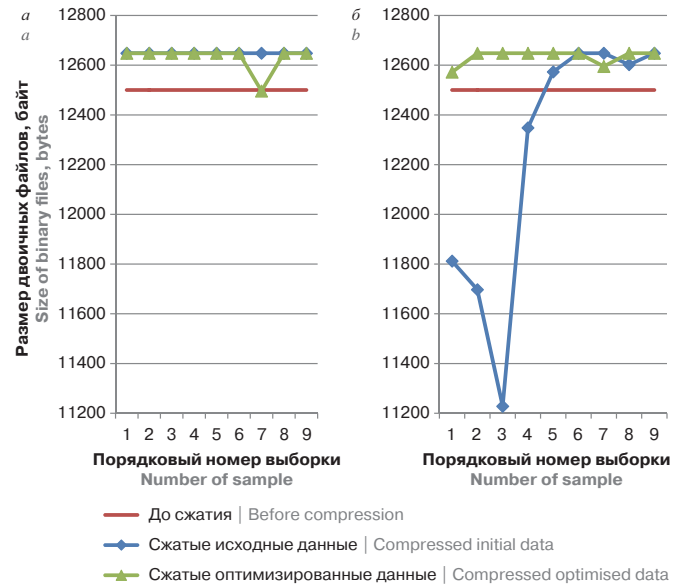


Рис. 5. Размер двоичных файлов после коррекции: а) при включенном генераторе тактовой частоты; б) при отключенном генераторе тактовой частоты

Fig. 5. The size of files after correction: а) when the clock generator is turned on; б) when the clock generator is turned off

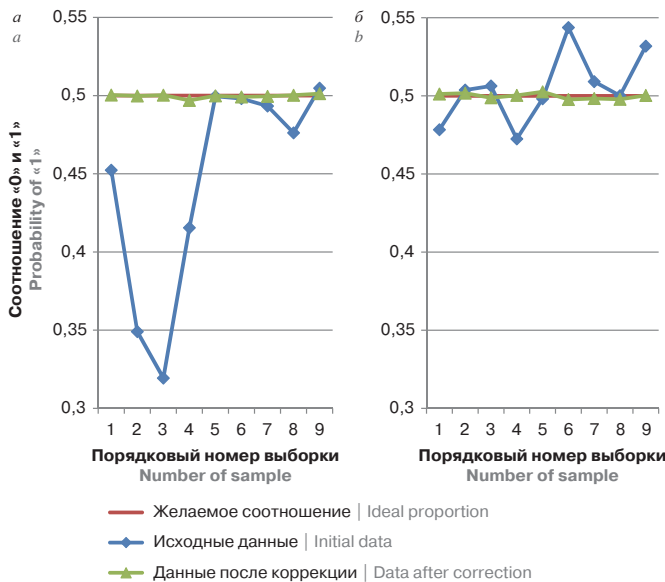


Рис. 6. Соотношение «0» и «1» в последовательности при отключенном генераторе тактовой частоты: а) для исходной последовательности; б) для оптимизированной последовательности

Fig. 6. The probability of «1» in the sequence when the clock generator is turned off: а) for the input sequence; б) for the optimized sequence

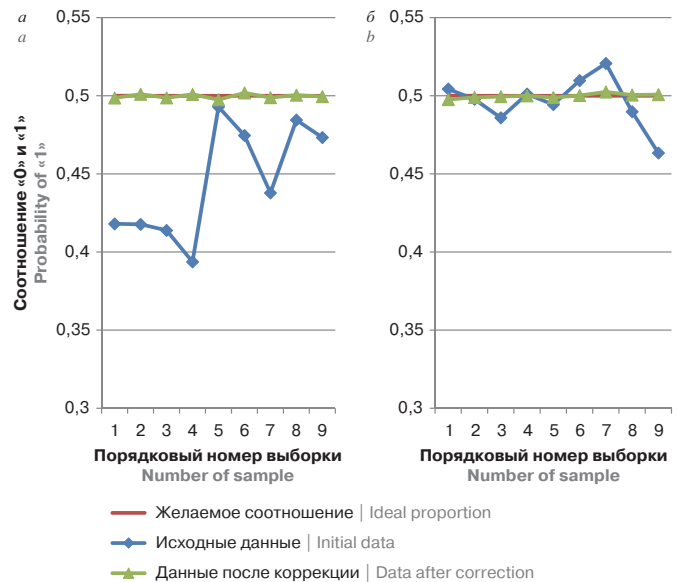


Рис. 7. Соотношение «0» и «1» в последовательности при включенном генераторе тактовой частоты: а) для исходной последовательности; б) для оптимизированной последовательности

Fig. 7. The probability of «1» in the sequence when the clock generator is turned on: а) for the input sequence; б) for the optimized sequence

при проведении преобразования фон Неймана, которая характеризует равномерность распределения значений в последовательности. Также в качестве критерия была выбрана степень сжатия архиватором последовательности после преобразования фон Неймана. Значение степени сжатия отображает отсутствие либо наличие закономерностей, обнаруженных архиватором. В случайной последовательности закономерностей быть не должно, поэтому размер сжатых файлов должен быть не меньше исходных. Так как

в каждой сложной цифровой микросхеме присутствуют генераторы тактового сигнала или тактовый сигнал подается извне, для анализа возможности влияния тактового сигнала на качество генерируемой случайной последовательности в тестовый кристалл был включен генератор тактовой частоты.

Были протестированы случайные последовательности, полученные с разработанных генераторов: исходного и оптимизированного. Анализ результатов производился по девяти выборкам



значений. После проведения преобразования фон Неймана исходные последовательности уменьшились в 4–5 раз.

Двоичные файлы случайных чисел до сжатия имели следующие размеры: исходная последовательность — 62500 байт; последовательность, полученная после преобразования фон Неймана — 12500 байт. Сжатие данных производилось с помощью программы 7z при следующих настройках: формат архива — zip, уровень сжатия — ультра, метод сжатия — Deflate, размер словаря 32 КБ, размер слова — 128.

При отключенном генераторе тактовой частоты средний размер исходной последовательности после сжатия составляет 59458 байта, что составляет 95% от исходного размера. Для последовательности, полученной после преобразования фон Неймана, это число составляет 12245 байта (98%).

При включенном генераторе тактовой частоты средний размер исходной последовательности после сжатия составляет 61754 байта (98,8%), для последовательности, полученной после преобразования фон Неймана, это число составляет 12648 байта (101,2%).

Средний размер оптимизированной последовательности после сжатия при отключенном генераторе тактовой частоты составляет 60866 байта (99,5%), для последовательности, полученной после преобразования фон Неймана, это число составляет 12633 байта (101,1%).

Средний размер оптимизированной последовательности после сжатия при включенном генераторе тактовой частоты составляет 62216 байта (98,8%), для последовательности, полученной после преобразования фон Неймана, это число составляет 12631 байта (101%).

На рис. 4 представлены размеры файлов сжатых последовательностей, полученных с исходного и оптимизированного блоков генератора случайных чисел, при отключенном и включенном генераторе тактовой частоты. Для наглядности также отображен размер исходной последовательности.

На рис. 5 представлены размеры файлов сжатых последовательностей после коррекции, полученных с исходного и оптимизированного блоков генератора случайных чисел, при отключенном и включенном генераторе тактовой частоты. Для наглядности также отображен размер исходной последовательности.

На рис. 6 представлено соотношение логических нулей и единиц при отключенном генераторе тактовой частоты для исходной и оптимизированной последовательностей.

На рис. 7 представлено соотношение логических нулей и единиц при включенном генераторе тактовой частоты для исходной и оптимизированной последовательностей.

По результатам исследования было установлено, что влияние генератора тактовой частоты не ухудшает статистические свойства сгенерированной случайной последовательности.

Для более точного определения качества полученных случайных чисел проводятся различные статистические тесты. Из самых обобщенных соображений можно выделить два класса критериев: эмпирические критерии, при использовании которых вычисляются некоторые статистики от групп случайных чисел; и теоретические критерии, для которых анализ последовательности чисел производится теоретико-числовыми методами, над рекуррентными правилами, образующими случайные числа [5].

В настоящее время существует большое количество программных средств для проверки качества случайных чисел. Для определения случайных чисел Национальным институтом стандартов и технологий (NIST) были разработаны 15 тестов. Эти тесты основаны на различных статистических свойствах, присущих только случайным последовательностям. Еще одним известным набором тестов для анализа случайных последовательностей является пакет diehard, который считается одним из наиболее строгих существующих наборов тестов. В данной работе для проверки свойств последовательности применялись тесты из пакета dieharder. Пакет содержит 114 тестов, включая

composition of final products were conducted in the laboratory of IC development department of MERI JSC. The goal of this research is to estimate the functionality of generators of the random sequence, and to compare the functionality of the original and optimized random sequence.

The following equipment was used for measurements: power supply — GwInstek GPD-73303S, generator/analyzer of signal — Lecroy ArbStudio 1104, circuit board based on FPGA Xilinx Virtex-4. The sequence of data from the generator random sequence output with a length of 62500 bytes was collected using the generator/analyzer of signal — Lecroy ArbStudio 1104.

A significant problem of hardware random number generators is a large number of deviations, and correlations in the generated sequence. The processes themselves may be random, but problems can arise in the measurement process. Therefore it is necessary to correct the received sequence of random numbers for increasing the entropy with the probability of logic zero and logic one being

approximately equal. There is a large number of correction methods of improving the quality of the sequence. The Von Neumann correction has been used in this work. The principle of this transformation is to split the original sequence into pairs of bits, and then select only those pairs where adjacent values are different, the pairs with the same value being removed. Specific values are assigned to selected pairs in the output sequence. Fig. 3 shows an example of such a transformation. In this example, the value 1 is assigned to the pair "10" and the value "0" is assigned to the pair "01", the pairs "00" and "11" are deleted from the sequence.

As a result of the von Neumann correction the sequence is significantly reduced, and its statistical properties approach the properties of random sequences.

The sequence was investigated according to several parameters for the rapid assessment of the data quality. One of the most revealing criteria of random sequences is the probability of logical "0" and "1" in the sequence, which ideally is equal to 50%. The next criterion was

the degree of shrink of the sequence length during the von Neumann correction, which characterizes the uniformity of values distribution in the sequence. After the von Neumann correction the criterion of the degree of compression sequence by the archiver was used. The value of compression shows the absence or the presence of regularities discovered by the archiver. There should not be regularities in a random sequence, so the size of the compressed files should be not smaller than the source. There are clock generators in every complex digital circuit. Therefore it was decided to include the clock generator in the test crystal for the analysis of its influence on the quality of generated random sequence.

Random sequences obtained with original and optimized generators have been tested. Analysis of the results was carried out on nine samples of values. After the von Neumann correction the initial sequence decreased by a factor of 4–5.

Binary files of random numbers before compression had the following sizes: the source

тесты diehard, NIST и прочие тесты. Автор утверждает невозможность прохождения всех тестов. Были протестированы как исходный, так и оптимизированный генераторы на технологиях 180 нм и 90 нм.

Входными данными для тестирования могут быть как выход программного генератора, так и входной файл с выборкой случайных чисел. Пакет dieharder очень требователен к объему входных данных, поэтому для проведения анализа были собраны большие объемы выборок. Опытным путем установлено, что необходимый минимум входных данных для большинства тестов составляет около 512 мегабайт. Для каждого тестового образца были собраны такие объемы случайных данных. Для двух образцов дополнительно было собрано по одному пакету объемом 1 гигабайт. Результат прохождения тестов dieharder для 1 ГБ данных аналогичен объему пакета 512 мегабайт. Исходная последовательность прошла малое количество тестов (2–3 из 114). Повышение энтропии методом фон Неймана привело к сокращению выборки в 12–14 раз (до 35–42 Мбайт) и к повышению количества проходящих тестов до 25–30 из 114.

Для проведения дальнейшего анализа было решено зашифровать файлы случайных чисел посредством алгоритма DES в режиме электронной кодовой книги (ЕСВ) с ключами «0». В результате получаемые последовательности успешно прошли 106–110 тестов из 114. Таким образом, в качестве наиболее эффективного метода улучшения статистических свойств случайной последовательности было выбрано шифрование файлов.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты. Коррекция фон Неймана может быть использована только для оценки годности генератора случайных чисел в составе изделия, критерием оценки является сокращение выборки не более чем в 16–18 раз. Для достижения высокого качества случайной последовательности повышение энтропии предлагается проводить при помощи того или иного

блока шифрования, имеющегося в составе кристалла. В результате работы были спроектированы и изготовлены образцы изделий с использованием техпроцессов с минимальными топологическими нормами 90 нм и 180 нм [6, 7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», История отечественной электроники: — М.: 2012. — Т. 1. — С. 539–563.
2. Красников Г.Я., Шелепин Н.А. «Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью», Международная научно-техническая конференция с элементами научной школы для молодежи. — М.: Зеленоград, 2010.
3. S.Timoshin, A.Nuykin, A.Kravtsov. *Extreme Low Cost Chip for HF RFID tag. 7th Annual IEEE International Conference on RFID, IEEE RFID 2013.* Orlando, US — 2013.
4. Ролдугина Ж.И., Нуйкин А.В. Влияние времени моделирования на статистическое распределение выходных значений сигнала аппаратного генератора случайного числа // Микроэлектроника и информатика — 2017: сборник статей. — М.: МИЭТ, 2017. — С. 170–176.
5. Слеповичев И.И. Введение в теорию генераторов псевдослучайных чисел. Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 128 с.
6. Нуйкин А.В., Кравцов А.С. «Разработка и внедрение кристаллов для смарт-карт на российском и международном рынках на основе решений АО «НИИМЭ» // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. — 2016. — № 1(161). — С. 4–8.
7. Нуйкин А.В., Кравцов А.С. «Перспективы развития систем радиочастотной идентификации на основе карт памяти и микропроцессорных карт», Международная конференция «Микроэлектроника 2015». Крым, Алушта — 2015.

sequence is 62,500 bytes; the sequence after the von Neumann correction — 12,500 bytes. Data compression was performed using 7z with the following settings: archive format — zip compression, level — ultra, compression method is Deflate, size of dictionary — 32KB, word size is 128.

When the clock generator is off, the average size of the initial sequence after compression is 59458 bytes, which is 95% of the original size. For a sequence obtained after the von Neumann correction, this number is 12245 bytes (98%).

When the clock generator is on, the average size of the initial sequence after compression is 61754 bytes (98.8%). For a sequence obtained after the von Neumann correction, this number is 12648 bytes (101.2%).

The average size of the optimized sequence after compression when the clock generator is off is 60866 bytes (99.5%). For the sequence obtained after the von Neumann correction, this number is 12633 bytes (101.1%).

The average size of the optimized sequence after compression when the clock generator

is on is 62216 bytes (98.8%). For a sequence obtained after the von Neumann correction, this number is 12631 bytes (101%).

Fig. 4 shows the sizes of files of compressed sequences obtained with original and optimized blocks of the random number generator, when the clock generator is disabled and enabled. For clarity the figure also illustrates the size of the original sequence.

Fig. 5 shows the file sizes of the compressed sequences obtained with the original and optimized blocks of the random number generator after the correction, when the clock generator is disabled and enabled. The size of the original sequence is also shown.

Fig. 6 shows the probability of logical one when the clock generator is off for the original and optimized sequences.

Fig. 7 shows the probability of logical one when the clock generator is on for the original and optimized sequences.

Due to the research it was found that the influence of the clock generator does not affect

the statistical properties of the generated random sequence.

Different statistical tests are used for more accurate determination of the quality of the resulting random numbers. In general it is possible to highlight two classes of criteria: empirical criteria and theoretical criteria; the first being used for calculating some statistics from groups of random numbers, and the second — for analyzing the sequence of numbers by number-theoretic methods over recurrence rules that form random numbers [5].

There is a large number of software tools for testing the quality of random numbers. National Institute of Standards and Technology (NIST) has developed 15 tests for determining the random number. These tests are based on various statistical properties that are inherent only to random sequences. Another famous set of tests for the analysis of random sequences is a diehard test, which is one of the most stringent existing test suites. In this paper, tests from the dieharder package were used to check the properties of the sequence.



The package contains 114 tests, including diehard, NIST, and other tests. The author contends that passing all the tests is impossible. The original and optimized generators were tested on the technologies of 180nm and 90nm.

The input test data may be both output of the generator and the input file with a sampling of random numbers. The dieharder package is very demanding as regards the amount of input data, so for the analysis large amounts of samples were collected. It is empirically established that the required minimum input for most tests is about 512 megabytes. Such a volume of random data was collected for each test sample. A volume of 1GB was collected for two additional samples. The result of dieharder tests for 1GB of data is similar to the package with volume of 512MB. The original sequence passed a small number of tests (2–3 of 114). An increase in entropy by the von Neumann correction led to the reduction of the sample by a factor of 12–14 (35–42MB) and increased the number of passed tests to 25–30 of 114.

For further analysis it was decided to encrypt the files with random numbers by the DES algorithm in the Electronic Codebook (ECB) mode with the keys "0". As a result, sequences successfully passed 106 to 110 tests of 114. Thus, file encryption was selected as the most effective

method of improving statistical properties of a random sequence.

The authors consider the following provisions and results as novel. The Von Neumann correction can only be used to assess the validity of the random number generator in the composition of the product; the evaluation criterion is the sample reduction by a factor not more than 16–18 times. To achieve a high quality random sequence it has been proposed to increase the entropy using an encryption block available in the composition of the crystal. As a result, product samples have been designed and manufactured using processes with minimal topological norms of 90nm and 180nm [6, 7].

REFERENCES

1. Krasnikov G. Ya., Gornev E. S. *Razvitiye poluprovodnikovoi mikroelektroniki OAO "NIIME i Mikron", Istoriya otechestvennoi elektroniki*: M.: 2012. T. 1. P. 539–563. (In Russian).
2. Krasnikov G. Ya., Shelepin N. A. *"Sostoyaniye i perspektivy razvitiya tekhnologii i elementnoi bazy SBIS s energonezavisimoi pamyat'yu"*, Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s elementami nauchnoi shkoly dlya molodezhi. M.: Zelenograd, 2010. (In Russian).
3. Timoshin S., Nuykin A., Kravtsov A. *Extreme Low Cost Chip for HF RFID tag. 7th Annual IEEE International Conference on RFID, IEEE RFID 2013*. Orlando, US — 2013.
4. Roldugina Zh. I., Nuikin A. V. *Vliyaniye vremeni modelirovaniya na statisticheskoe raspredeleniye vykhodnykh znachenii signala apparatnogo generatara sluchainogo chisla* // Mikroelektronika i informatika — 2017: sbornik statei. M.: MIET, 2017. P. 170–176. (In Russian).
5. Slepovichev I. I. *Vvedeniye v teoriyu generatorov psevdosluchainykh chisel*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 128 p. (In Russian).
6. Nuikin A. V., Kravtsov A. S. *"Razrabotka i vnedreniye kristallov dlya smart-kart na rossiiskom i mezhdunarodnom rynkakh na osnove reshenii AO "NIIME" // Elektronnaya tekhnika. Seriya 3. Mikroelektronika*. 2016. № 1(161). P. 4–8. (In Russian).
7. Nuikin A. V., Kravtsov A. S. *"Perspektivy razvitiya sistem radiochastotnoi identifikatsii na osnove kart pamyati i mikroprotsektorov"*, Mezhdunarodnaya konferentsiya "Mikroelektronika 2015". Krym, Alushta — 2015. (In Russian).

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



ПОЛУЗАКАЗНЫЕ БИС НА БМК СЕРИЙ 5503 И 5507. В 4 КН.: ПРАКТ. ПОСОБИЕ. КН. 4. БИБЛИОТЕКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ САМОСИНХРОННЫХ ПОЛУЗАКАЗНЫХ МИКРОСХЕМ СЕРИЙ 5503 И 5507

Ю. А. Степченков, А. Н. Денисов, Ю. Г. Дьяченко, Ф. И. Гринфельд, О. П. Филимоненко, Н. В. Морозов, Д. Ю. Степченков, Л. П. Плеханов
под общ. ред. академика РАН А. Н. Саурова

Цена 920 руб.

М: ТЕХНОСФЕРА, 2017. — 376 с.
ISBN 978-5-94836-441-4

Это четвертая книга серии учебных пособий из 4 книг, посвященных общим сведениям о базовых матричных кристаллах, вопросам методологии проектирования, средствам проектирования САПР «Ковчег» и библиотекам ячеек полузаказных микросхем серий 5503 и 5507.

Книга содержит описание библиотеки функциональных ячеек, предназначенных для проектирования средствами САПР «Ковчег» самосинхронных интегральных микросхем на основе базовых матричных кристаллов серий 5503 и 5507. Самосинхронные схемы характеризуются рядом параметров, выгодно отличающих их от синхронных схем, в том числе устойчивостью функционирования к разбросу и отклонениям параметров элементной базы из-за старения элементов, влиянию внешних воздействующих факторов, напряжения источника питания.

Предназначена для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры, а также для преподавателей, студентов старших курсов и аспирантов, изучающих современные методы проектирования специализированных БИС.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; ☎ +7 (495) 956-3346; ✉ knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru