

21. Gayduk A.R., Plaksienko E.A. Optimal'noe po kvadraticnomu kriteriyu upravlenie nelineynymi sistemami [Optimal quadratic criterion control of nonlinear systems], *Nauchnyy vestnik NGTU* [Scientific Bulletin of NSTU], 2014, No. 4 (57), pp. 7-18.
22. Plaksienko V.S., Plaksienko N.E., Sidenkov A.S. Issledovanie sistemy FAPCh s fazo-vym diskriminatom s obratnymi svyazyami [The study of the system PLL with the phase of the mode discriminator with feedback], *Nauchnyy vestnik NGTU* [Scientific Bulletin of NSTU], 2014, No. 4 (57), pp. 109-118.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Марчук.

Плаксиенко Владимир Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: vsp46@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371408; кафедра радиоприемных устройств и телевидения; д.т.н.; профессор.

Гайдук Анатолий Романович – e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; тел.: 88634371773; кафедра систем автоматического управления; д.т.н.; профессор.

Plaksienko Vladimir Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: vsp46@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371408; the department of radio receivers and television; dr. of eng. sc.; professor.

Gaiduk Anatoly Romanovich – e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; phone: +78634371773; the department of automatic control systems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.391.24.001.57

Г.Г. Галустов

ГЕНЕРИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЛОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ С РАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Приведенный в работе анализ работы генератора с использованием вероятностного двоичного элемента и сдвигового регистра позволил получить аналитическую связь между корреляционной функцией двоичной случайной цифровой последовательности с корреляционной функцией случайной числовой последовательности, получаемой в сдвиговом регистре при определенном количестве сдвигов двоичной последовательности. Полученные аналитические зависимости могут помочь при оценивании статистических характеристик процессов при решении задач статистического моделирования, при этом предполагается, что формирование двоичной последовательности с выхода двоичного вероятностного элемента получается с использованием физического шумового процесса. Если при этом используется псевдослучайный шумовой сигнал, то моменты высших порядков числовой последовательности с выходов сдвигового регистра могут носить не гауссовский характер и это может привести смещению оцениваемых моментных характеристик. В работе показано, что отмеченные погрешности при статистическом моделировании с использованием псевдослучайных чисел не возникают, если исследуются модели линейных систем с постоянными параметрами, если исследуются модели нелинейных систем, то моменты высших порядков могут иметь не гауссовское распределение

Плотность вероятности; случайные процессы; генератор физических шумов; корреляционная функция; двоичная случайная последовательность; сдвиговый регистр; тактовая последовательность.

G.G. Galustov

GENERATION RANDOM NUMBER SEQUENCES WITH UNIFORM DISTRIBUTION

Given in the analysis of work of the generator with the use of probabilistic binary element and a shift register allowed us to obtain an analytical relationship between the correlation function of random binary sequences with correlation function of a random numerical sequence re-

ceived in the shift register at a certain number of shifts of the binary sequence. Analytical dependences can help in evaluating the statistical characteristics of the processes in solving problems of statistical modeling, it is speculated that the formation of the binary sequence output from the binary probabilistic element is produced using a physical noise process. If it uses pseudo-random noise signal, the higher-order moments of the numerical sequence from the outputs of the shift register can not be of a Gaussian nature and this may lead to bias of estimated torque characteristics. Abstract given in work analysis of generator using probabilistic binary element and the shift register has yielded an analytical relationship between the correlation function binary random digital sequence with correlation function of random numeric sequence obtained in shifted register when a certain amount of shifts the binary sequence. Analytical dependences obtained can help when assessing the statistical characteristics of processes in solving problems of statistical modeling. It is shown that the observed errors in statistical modeling using pseudo-random numbers do not occur if the model examines linear systems with constant parameters, if studied models of non-linear systems, higher order moments can have a Gaussian distribution.

Density probability; random processes; physical generator noise correlation function; random binary sequence; shift register; sequencing.

Действие физических генераторов случайных чисел с использованием вероятностных двоичных элементов (ВДЭ) [1–6, 16] основано либо на заполнении двоичной случайной последовательностью сдвигового регистра (рис. 1), либо на образовании случайных чисел за счет параллельной работы N ВДЭ (рис. 2).

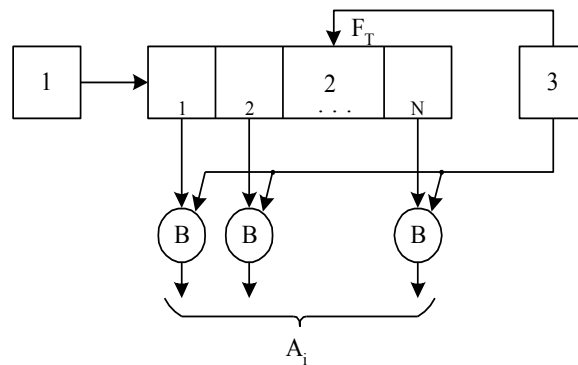


Рис. 1. ГСЧ с одним ВДЭ

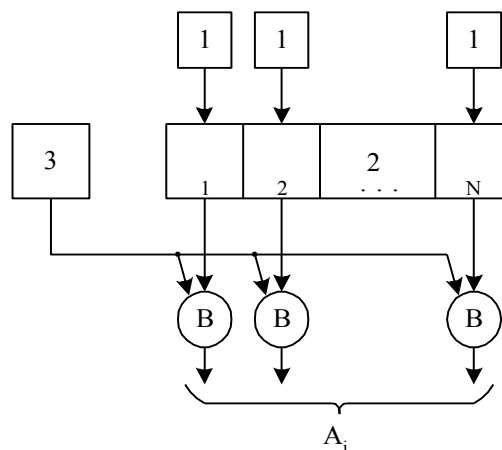


Рис. 2. ГСЧ с N – ВДЭ

Генератор с заполнением регистра отличается простотой устройства, содержит всего один источник случайных двоичных цифр (ВДЭ) для получения чисел с произвольным числом двоичных разрядов. Блок-схема генератора такого типа показана на рис. 1, где 1 – двоичный вероятностный элемент; 2 – регистр сдвига на N разрядов; 3 – генератор тактовых импульсов.

Генераторы случайных чисел (ГСЧ), работа которых основана на параллельном включении ВДЭ, характеризуется тем, что для получения каждого разряда N -разрядного числа, используется самостоятельный ВДЭ.

Блок-схема генератора такого типа показана на рис. 2, где 1 – вероятностные двоичные элементы; 2 – регистр; 3 – генератор тактов [7–9, 13–15].

Приведенные блок-схемы могут быть использованы для получения N -разрядных равномерно распределенных случайных чисел A_i , при условии, что значения случайной двоичной последовательности на выходе ВДЭ 1 являются некоррелированными. Таким образом, для получения N двоичных случайных разрядов числа A_i в каждый такт работы устройства потребуется N источников двоичных случайных цифр либо один источник, но при этом скорость выдачи чисел A_i падает в N раз.

Определим основные статистические характеристики последовательности случайных чисел A_i на выходах описываемых генераторов. Для генератора, имеющего на выходе N -разрядный регистр, имеем [8–12].

$$M_A = \sum_{i=1}^{2^N-1} P_i A_i.$$

Так как P_i при равномерном распределении равно $1/2^N$, а любое число A_i может быть представлено в виде $i/2^N$, то получим

$$M_A = \sum_{i=1}^{2^N-1} \frac{1}{2^N} \cdot \frac{i}{2^N} = \frac{1}{2^{2N}} \sum_{i=1}^{2^N-1} i = \frac{(2^N-1)2^N}{2^{2N} \cdot 2} = \frac{1-2^{-N}}{2}. \quad (1)$$

Найдем средний квадрат чисел

$$\begin{aligned} \bar{A}_i^2 &= \sum_{i=1}^{2^N-1} P_i A_i^2 = \frac{1}{2^{3N}} \sum_{i=1}^{2^N-1} i^2 = \frac{(2^N-1)2^N(2 \cdot 2^N - 2 + 1)}{2^{3N}} = \\ &= \frac{(2^N-1)(2^{N+1}-1)}{6 \cdot 2^N} = \frac{(1-2^{-N})(2-2^{-N})}{6}. \end{aligned}$$

Определим дисперсию последовательности чисел

$$\sigma_A^2 = \bar{A}_i^2 - M_A^2 = \frac{(1-2^{-N})(2-2^{-N})}{6} - \frac{(1-2^{-N})^2}{4} = \frac{1-2^{-2N}}{12}. \quad (2)$$

Корреляционную функцию последовательности чисел A_i будем искать в виде

$$R_A(mT_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} A_i(iT_0) A_{i+m}[(i+m)T_0] - M_A^2. \quad (3)$$

Для определения первого члена в (3) представим числа $A(iT_0)$ и $A[(i+m)T_0]$ в виде суммы произведений значений разрядов на их весовые коэффициенты и произведем все возможные перемножения между разрядами этих чисел. Значения произведений и соответствующие им веса сведены в табл. 1. Для удобства написания таблицы произведения разрядов в табл. 1 заменены на произведения соответствующих этим разрядам индексов.

Обозначим

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \cdot a_{i+v} = B_a(vT_0). \tag{4}$$

Тогда, обращаясь к табл. 1, видим, что она состоит из элементов типа (4) (при условии, что объем числовой последовательности A_i $n \rightarrow \infty$) с различными v , помноженными на соответствующие весовые коэффициенты. Для установления закономерности изменения весовых коэффициентов перед $B_a(vT_0)$ в табл. 1, построим табл. 2, в которой сгруппируем $B_a(vT_0)$ с одинаковыми коэффициентами.

Таблица 1

A_i	$a_i 2^{-1}$	$a_{i+1} 2^{-2}$	$a_{i+2} 2^{-3}$	$a_{i+3} 2^{-4}$	$a_{i+4} 2^{-5}$	...	$a_{i+N-3} 2^{-(N-2)}$	$a_{i+N-2} 2^{-(N-1)}$	$a_{i+N-1} 2^{-N}$
A_{i+m}	$a_{i+m} 2^{-1}$	$a_{i+m+1} 2^{-2}$	$a_{i+m+2} 2^{-3}$	$a_{i+m+3} 2^{-4}$	$a_{i+m+4} 2^{-5}$	...	$a_{i+m+N-3} 2^{-(N-2)}$	$a_{i+m+N-2} 2^{-(N-1)}$	$a_{i+m+N-1} 2^{-N}$
2^{-2}	$i(i+m)$								
2^{-3}	$(i+1)(i+m)$	$i(i+m+1)$							
2^{-4}	$(i+2)(i+m)$	$(i+1)(i+m+1)$	$i(i+m+2)$						
2^{-5}	$(i+3)(i+m)$	$(i+2)(i+m+1)$	$(i+1)(i+m+2)$	$i(i+m+3)$					
...							...		
...							...		
...							...		
...							...		
$2^{-(N+1)}$	$(i+N-1)(i+m)$	$(i+N-2)(i+m+1)$	$(i+N-3)(i+m+2)$	...	...	...	$(i+2)(i+m+N-3)$	$(i+1)(i+m+N-2)$	$i(i+m+N-1)$
...							...		
...							...		
...							...		
...							...		
$2^{-(2N-3)}$	$(i+N-1)(i+m+N-4)$	$(i+N-2)(i+m+N-3)$	$(i+N-3)(i+m+N-2)$	$(i+N-4)(i+m+N-1)$					
$2^{-(2N-2)}$	$(i+N-1)(i+m+N-3)$	$(i+N-2)(i+m+N-2)$	$(i+N-3)(i+m+N-1)$						
$2^{-(2N-1)}$	$(i+N-1)(i+m+N-2)$	$(i+N-2)(i+m+N-1)$							
$2^{-(2N)}$	$(i+N-1)(i+m+N-1)$								

Таблица 2

2^{-2}	$Ba(m)T_0$
2^{-3}	$Ba(m-1)T_0 + Ba(m+1)T_0$
2^{-4}	$Ba(m-2)T_0 + Ba(m)T_0 + Ba(m+2)T_0$
2^{-5}	$Ba(m-3)T_0 + Ba(m-1)T_0 + Ba(m+1)T_0 + Ba(m+3)T_0$
$2^{-(N+1)}$	$Ba[m-(N+1-2)]T_0 + Ba[m-(N+1-4)]T_0 +$ $+Ba[m-(N+1-6)]T_0 \dots Ba[m+(N+1-6)]T_0 +$ $+Ba[m+(N+1-4)]T_0 + Ba[m+(N+1-2)]T_0$
$2^{-(2N-3)}$	$Ba(m-3)T_0 + Ba(m-1)T_0 + Ba(m+1)T_0 + Ba(m+3)T_0$
$2^{-(2N-2)}$	$Ba(m-2)T_0 + Ba(m)T_0 + Ba(m+2)T_0$
$2^{-(2N-1)}$	$Ba(m-1)T_0 + Ba(m+1)T_0$
$2^{-(2N)}$	$Ba(m)T_0$

Анализируя табл. 2, имеем [8, 9].

$$\begin{aligned}
 & B_a(mT_0)[2^{-2} + 2^{-4} + 2^{-6} + \dots + 2^{-2N}] \\
 & \{B_a[(m+1)T_0] + B_a[(m-1)T_0]\} \cdot 2^{-1} [2^{-2} + 2^{-4} + 2^{-6} + \dots + 2^{-(2N-2)}] \\
 & \{B_a[(m+2)T_0] + B_a[(m-2)T_0]\} \cdot 2^{-2} [2^{-2} + 2^{-4} + 2^{-6} + \dots + 2^{-(2N-4)}] \\
 & \dots \\
 & \dots \\
 & \{B_a[(m-N+1)T_0] + B_a[(m+N-1)T_0]\} \cdot 2^{-(N-1)} \cdot 2^{-2}.
 \end{aligned}$$

Отсюда видно, что выражение для первого члена правой части (3) будет состоять из членов вида

$$\{B_a[(m+j)T_0] + B_a[(m-j)T_0]\} \frac{2^{-j} [1 - 2^{-2(N-j)}]}{3},$$

а корреляционная функция может быть записана в виде

$$\begin{aligned}
 R_A(mT_0) = & \sum_{j=1}^{N-1} \{B_a[(m+j)T_0] + B_a[(m-j)T_0]\} \frac{2^{-j} [1 - 2^{-2(N-j)}]}{3} + \\
 & + B_a(mT_0) \frac{1 - 2^{-2N}}{3} - M_A^2.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Учитывая, что

$$B_a(mT_0) = R_a(mT_0) + M_a^2 \quad (6)$$

и подставляя значения M_A^2 из (1), а также значение $M_a^2 = 0,25$, получим

$$\begin{aligned}
 R_A(mT_0) = & \sum_{j=1}^{N-1} \{R_a[(m+j)T_0] + R_a[(m-j)T_0]\} \frac{2^{-j} [1 - 2^{-2(N-j)}]}{3} + R_a(mT_0) \frac{1 - 2^{-2N}}{3} + \\
 & + \frac{1}{4} \left\{ 2 \sum_{j=1}^{N-1} \frac{2^{-j} [1 - 2^{-2(N-j)}]}{3} + \frac{1 - 2^{-2N}}{3} \right\} - \frac{(1 - 2^{-N})^2}{4}.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Упростим выражение в фигурных скобках (7):

$$2 \sum_{j=1}^{N-1} \frac{2^{-j} [1 - 2^{-2(N-j)}]}{3} + \frac{1 - 2^{-2N}}{3} = 2 \sum_{j=0}^{N-1} \frac{2^{-j} [1 - 2^{-2(N-j)}]}{3} - \frac{1 - 2^{-2N}}{3} = c;$$

$$\sum_{j=0}^{N-1} \frac{2^{-j} [1 - 2^{-2(N-j)}]}{3} = \frac{1}{3} \left[\sum_{j=0}^{N-1} 2^{-j} - 2^{-2N} \sum_{j=0}^{N-1} 2^j \right] = z \cdot \frac{1}{3};$$

$$\sum_{j=0}^{N-1} 2^{-j} = \sum_{k=1}^N 2^{-(k-1)} = \frac{1 - 2^{-N}}{1 - 2^{-1}} = 2(1 - 2^{-N});$$

$$\sum_{j=0}^{N-1} 2^j = \sum_{k=1}^N 2^{k-1} = \frac{2^N - 1}{2 - 1} = 2^N - 1,$$

$$z = 2 - 2 \cdot 2^{-N} - 2^{-N} + 2^{-2N} = 2^{-2N} - 3 \cdot 2^{-N} + 2 = (1 - 2^{-N})(2 - 2^{-N}),$$

$$c = \frac{1}{3} [2(1 - 2^{-N})(2 - 2^{-N}) - (1 - 2^{-2N})] = (1 - 2^{-N})^2.$$

Подставляя последнее выражение в (7), получаем

$$R_A(mT_0) = \sum_{j=1}^{N-1} \{R_a[(m+j)T_0] + R_a[(m-j)T_0]\} \frac{2^{-j} [1 - 2^{-2(N-j)}]}{3} + R_a(mT_0) \frac{1 - 2^{-2N}}{3}. \quad (8)$$

Если двоичная случайная последовательность на выходе ВДЭ такова, что

$$M_a^2 = \frac{1}{4}; R_a(mT_0) = 0 \text{ при } mT_0 \neq 0 \text{ и } R_a(0) = \sigma_a^2 = \frac{1}{4},$$

то корреляционная функция числовой последовательности A_i на выходе генератора (рис. 1) будет иметь вид [8, 9].

$$R_A(mT_0) = R_a(0) \frac{2^{-m} [1 - 2^{-2(N-m)}]}{3},$$

$$R_A(0) = R_a(0) \frac{1 - 2^{-2N}}{3} = \frac{1 - 2^{-2N}}{12} = \sigma_A^2, \quad (9)$$

нормированная функция корреляции в этом случае будет равна

$$\rho_A(mT_0) = \frac{R_A(mT_0)}{R_A(0)} = \frac{2^{-m} [1 - 2^{-2(N-m)}]}{1 - 2^{-2N}}. \quad (10)$$

Последнее выражение зависит только от количества сдвигов “ m ” регистра 2 между съемами чисел A_i и количества разрядов в регистре N .

Выражения (8) и (9) проверены экспериментально с помощью физического генератора с регистром сдвига (см. рис. 1). На рис. 3 представлены теоретические, подсчитанные по формулам (8), (9), и экспериментальные значения функции корреляции, при этом выражение (8) использовано, когда соотношение $2\lambda T_0 = 1$, а выражение (9) использовано, когда $2\lambda T_0 = 5$, т.е. когда $R_a(mT_0)$ при $m \neq 0$ можно принять равным нулю.

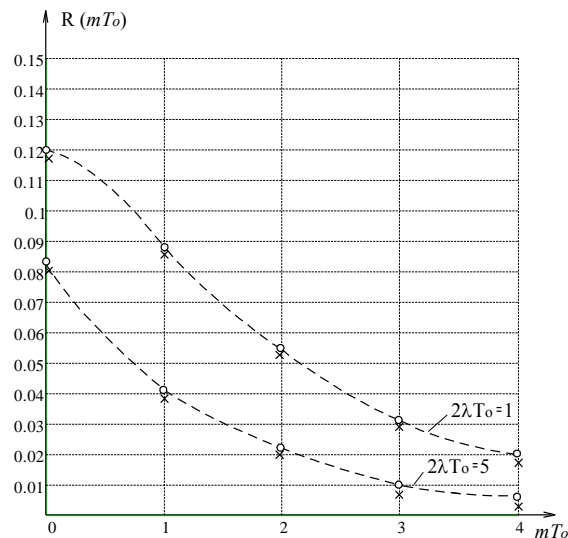


Рис. 3. Корреляционные функции числовой последовательности на выходе генератора

Для определения корреляционной функции числовой последовательности на выходе генератора с параллельной работой ВДЭ (см. рис. 2), заметим, что в этом случае коррелированными могут быть только одноименные разряды числовой последовательности A_i .

Обращаясь к выражению (8), легко видеть, что в случае отсутствия корреляции между различными разрядами числа A_i первый член первой части будет равен нулю. То есть для генератора с параллельной работой ВДЭ можно записать

$$R_A(mT_0) = R_a(mT_0) \frac{1 - 2^{-2N}}{3}. \quad (11)$$

Выражение (11) справедливо в случае, если корреляционные функции ВДЭ, образующие разряды случайного числа A_i , будут одинаковыми. Если же такого положения не существует, то корреляционная функция будет иметь вид

$$R_A(mT_0) = \sum_{i=1}^N R_{ai}(mT_0) 2^{-2i}. \quad (12)$$

То есть функция корреляции случайных чисел на выходе генератора будет равна сумме произведений функций корреляций ВДЭ, образующих случайные числа, на соответствующие весовые коэффициенты. Из сказанного выше следует, что экономически целесообразно построение генераторов с циклическим отсчетом (см. рис. 1), но, как видно из соотношения (10), получение некоррелированных равномерно распределенных чисел на его выходе связано с потерей в быстродействии во столько раз, какое количество разрядов в регистре сдвига [4, 10, 11].

Полученные аналитические зависимости между корреляционной функцией на выходе ВДЭ и корреляционной функцией числовой последовательности с выхода сдвигового регистра могут помочь при оценивании статистических характеристик процессов, получаемых с выходов вероятностных автоматов различных типов, а также при решении задач статистического моделирования [7, 9, 12].

В заключение следует заметить, что при статистическом моделировании нелинейных систем с использованием псевдослучайных чисел распределение моментов высших порядков на выходах могут носить не гауссовский характер, что может привести к смещению их оценок [4]. Однако таких проблем не возникает, если исследуются модели линейных систем с постоянными параметрами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галустов Г.Г. Анализ параметров качества при конструировании имитаторов помех // Вопросы обработки сигналов в системах пассивной радиолокации. – 1983. – Вып. 7. – С. 66-73.
2. Галустов Г.Г., Панов Д.Н., Орличенко А.Н. Анализ неравномерности случайной числовой последовательности, полученной на основе двоичной случайной последовательности // Статистический анализ и моделирование процессов и систем. – Таганрог, 1979. – С. 86-92.
3. А.с. 193163 (СССР). Экономичный быстродействующий датчик равномерно распределенных случайных чисел / Галустов Г.Г., Бойченко В.М., Гладкий В.С. Кл. 42m³.
4. Корн Г. Моделирование случайных процессов на аналоговых и аналогово-цифровых машинах. – М.: Мир, 1968. – 315 с.
5. Тихонов В.И. Характеристики выбросов случайных процессов // Радиотехника и электроника. – 1964. – № 3.
6. Галустов Г.Г., Галустов А.Г. Синтез параметров базовых случайных процессов при решении задач статистического моделирования // Радиотехника. Вып. 54. Радиоэлектронные устройства и системы управления, локации и связи. – 2001. – № 7. – С. 76-80.
7. Нейман В.И., Пармонов Ю.В. Электронный датчик случайных чисел // Проблемы передачи информации. – 1961. – Вып. 9.
8. Галустов Г.Г., Панов Д.Н. Определение корреляционной функции числовой последовательности на выходе сдвигового регистра // Статистический анализ и моделирование процессов и систем. – 1976. – Вып. 2. – С. 17-21.
9. Галустов Г.Г. Моделирование случайных процессов и оценивание их статистических характеристик. – М.: Радио и связь, 1999. – 120 с.

10. Иванов М.А., ЧуGUNков И.В. Теория, применение и оценка качества генераторов псевдослучайных последовательностей. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2003. – 240 с.
11. Бакалов В.П. Цифровое моделирование случайных процессов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. – 88 с.
12. Бараш Л. Алгоритм AKS проверки чисел на простоту и поиск констант генераторов псевдослучайных чисел // Безопасность информационных технологий. – 2005. – № 2. – С. 27-38.
13. Успенский В.А. Четыре алгоритмических лица случайности. – М.: МЦНМО, 2006. – 48 с. – ISBN 978-5-94057-485-9.
14. Жельников В. Криптография от папируса до компьютера. – М.: АБФ, 1996. – 335 с. – ISBN 5-87484-054-0.
15. Баркер Э., Келси Дж. Рекомендация для поколения случайного числа, используя детерминированные случайные генераторы долота, NIST SP800-90A, январь 2012.
16. Куликов Д., Ли А. Новый датчик для регистрации психофизических воздействий на основе полупроводниковых генераторов шума // Аномалия. – 2009. – № 4. – С. 3-9.
17. Galustov G.G., Voronin V.V. Parameters estimation of random sequence in the stochastic calculating devices // 23rd Telecommunications Forum TELFOR 2015, 24-26th November 2015 (Belgrade, Serbia). – P. 670-673.
18. Menezes A., van Oorschot P., Vanstone S. Handbook of Applied Cryptography. – CRC Press, 1997.
19. Cortois P.J. Decomposability instabilities and saturation in multiprogramming system // Communications of the ACM. – 1975. – Vol. 18, No. 7. – P. 371-377.
20. Kumar A. Equivalent queueing networks and their use in approximate equilibrium analysis // The Bell system technical J. – 1982. – Vol. 62, No. 10. – P. 2893-2907.

REFERENCES

1. Galustov G.G. Analiz parametrov kachestva pri konstruirovanii imitatorov pomekh [Analysis of quality parameters in the design simulators of interference], *Voprosy obrabotki signalov v sistemakh passivnoy radiolokatsii* [Problems of signal processing in passive radar systems], 1983, Issue 7, pp. 66-73.
2. Galustov G.G., Panov D.N., Orlichenko A.N. Analiz neravnomernosti sluchaynoy chislovooy posledovatel'nosti, poluchenooy na osnove dvoichnoy sluchaynoy posledovatel'nosti [The analysis of irregular random number sequence derived from a random binary sequence], *Statisticheskii analiz i modelirovanie protsessov i sistem* [Statistical analysis and modeling of processes and systems]. Taganrog, 1979, pp. 86-92.
3. A.s. 193163 (USSR). Ekonomichnyy bystrodeystvuyushchiy datchik ravnomerno raspredelennykh sluchaynykh chisel [Cost-effective high-speed sensor is uniformly distributed by the random number]. Galustov G.G., Boychenko V.M., Gladkiy V.S. Kl. 42m3.
4. Korn G. Modelirovanie sluchaynykh protsessov na analogovykh i analogovo-tsifrovyykh mashinakh [Simulation of stochastic processes in the analogue and analogue-digital machines]. Moscow: Mir, 1968, 315 p.
5. Tikhonov V.I. Kharakteristiki vybrosov sluchaynykh protsessov [Characteristics of random signal], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 1964, No. 3.
6. Galustov G.G., Galustov A.G. Sintez parametrov bazovykh sluchaynykh protsessov pri reshenii zadach statisticheskogo modelirovaniya [The synthesis parameters of the underlying stochastic processes when solving problems of statistical modeling], *Radiotekhnika. Vol. 54. Radioelektronnye ustroystva i sistemy upravleniya, lokatsii i svyazi* [Radiotekhnika. Issue 54. Radiales-tron devices and systems management, location and communication], 2001, No. 7, pp. 76-80.
7. Neyman V.I., Paramonov Yu.V. Elektronnyy datchik sluchaynykh chisel [Electronic sensor of random numbers], *Problemy peredachi informatsii* [Problems of information transmission], 1961, Issue 9.
8. Galustov G.G., Panov D.N. Opredelenie korrelyatsionnoy funktsii chislovooy posledovatel'nosti na vykhode sdvigovogo registra [The definition of the correlation function numerical sequence the output shift register], *Statisticheskii analiz i modelirovanie protsessov i sistem* [Statistical analysis and modeling of processes and systems], 1976, Issue 2, pp. 17-21.

9. Galustov G.G. Modelirovanie sluchaynykh protsessov i otsenivanie ikh statisticheskikh kharakteristik [Modeling of random processes and estimation of their statistical characteristics]. Moscow: Radio i svyaz', 1999, 120 p.
10. Ivanov M.A., Chugunkov I.V. Teoriya, primeneniye i otsenka kachestva generatorov psevdosluchaynykh posledovatel'nostey [Theory, implementation, and evaluation of the quality of pseudorandom sequences]. Moscow: KUDITs-OBRAZ, 2003, 240 p.
11. Bakalov V.P. Tsifrovoye modelirovanie sluchaynykh protsessov [Digital simulation of random processes]. Moscow: SAYNS-PRESS, 2002, 88 p.
12. Barash L. Algoritm AKS proverki chisel na prostotu i poisk konstant generatorov psevdosluchaynykh chisel [The AKS algorithm checks for Prime numbers and the search for constants of the pseudo-random number generator], *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy* [Bezopasnost Informatsionnykh Tekhnology], 2005, No. 2, pp. 27-38.
13. Uspenskiy V.A. Chetyre algoritmicheskikh litsa sluchaynosti [Four algorithmic faces of randomness]. Moscow: MTsNMO, 2006, 48 p. ISBN 978-5-94057-485-9.
14. Zhel'nikov V. Kriptogpafiya ot papirusa do komp'yutepa [Cryptography from papyrus to computer]. Moscow: ABF, 1996, 335 p. ISBN 5-87484-054-0.
15. Barker E., Kelsi Dzh. Rekomendatsiya dlya pokoleniya sluchaynogo chisla, ispol'zuya determinirovannyye sluchaynye generatory dolota, NIST SP800-90A, yanvar' 2012 [Recommendation for random number generation using deterministic-mined random bit generators, NIST SP800-90A, January 2012].
16. Kulikov D., Li A. Novyy datchik dlya registratsii psikhofizicheskikh vozdeystviy na osnove poluprovodnikovyykh generatorov shuma [A new sensor for registration of psychophysical effects on the basis of semiconductor noise generators], *Anomaliya* [Anomaly], 2009, No. 4, pp. 3-9.
17. Galustov G.G., Voronin V.V. Parameters estimation of random sequence in the stochastic calculating devices, *23rd Telecommunications Forum TELFOR 2015, 24-26th November 2015 (Belgrade, Serbia)*, pp. 670-673.
18. Menezes A., van Oorshot P., Vanstone S. Handbook of Applied Cryptography. CRC Press, 1997.
19. Cortois P.J. Decomposability instabilities and saturation in multiprogramming system, *Communications of the ACM*, 1975, Vol. 18, No. 7, pp. 371-377.
20. Kumar A. Equivalent queueing networks and their use in approximate equilibrium analysis, *The Bell system technical J.*, 1982, Vol. 62, No. 10, pp. 2893-2907.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Марчук.

Галустов Геннадий Григорьевич – Южный федеральный университет; e-mail: g.galustov@ya.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89045011525; кафедра радиоприёмных устройств и телевидения; зав. кафедрой; д.т.н.

Galustov Gennady Grigorevich – Southern Federal University; e-mail: g.galustov@ya.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79045011525; the department of radio receivers and television; head the department; dr. of eng. sc.

УДК 521.3.01

П.Ю. Волощенко, Ю.П. Волощенко, С.Б. Мальков

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИИ СИГНАЛОВ В ОДНОМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЦЕПИ

Проведено аналитическое исследование композиции волн в электронной цепи с распределенными параметрами методами схем замещения, эквивалентных синусоид и комплексных амплитуд, двух узлов и активного двухполюсника, законов Кирхгофа и теоремы Телледжена. Она моделирует электрические и нелинейные электронные процессы взаимодействия единого электромагнитного (ЭМ) поля микрополосковой воздушной линии и носителей заряда в двух полупроводниковых приборах (ПП) СВЧ. Считаем, что ее геометрическая конфигурация, а также свойства окружающей среды остаются неизменными вдоль