

УДК 004.056; 004.421.5

В.Н. Максимович, О.И. Гарасимчук, М.Н. Мандрона

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ПУАССОНОВСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ФИБОНАЧЧИ

Введение

Генераторы пуассоновских импульсных последовательностей (ГПИП) широко используются во многих отраслях техники при моделировании различных процессов, имеющих случайный временной и пространственный характер [1–4], в частности для имитации выходных сигналов дозиметрических детекторов при проектировании, налаживании и проверке приборов для измерения параметров ионизирующего излучения [5].

За последнее время опубликованы работы, в которых приведены новые [1–3], достаточно эффективные принципы реализации программных и аппаратных ГПИП, предложены их структуры, основанные на использовании генераторов псевдослучайных чисел (ГПСЧ), разработаны методики оценки качества их выходных сигналов [6, 7].

Однако в настоящее время нерешенными остаются следующие задачи:

- оптимизация параметров структурных элементов ГПИП для получения заданных параметров выходной импульсной последовательности;
- определение границ значений управляющего кода, задающих диапазон значений средней частоты выходной импульсной последовательности, при которой она отвечает пуассоновскому закону распределения;
- усовершенствование ГПИП, работающих в двоично-десятичном коде, которые удобны для использования во многих прикладных задачах.

Цель работы — определение границ управляющего кода, при котором выходная импульсная последовательность соответствует пуассоновскому закону распределения.

Схема ГПИП и принцип его работы

В состав генератора [4], схема которого представлена на рис. 1, входят: модифицированный аддитивный генератор Фибоначчи (МАГФ), содержащий регистры R_{г1}–R_{г5}, комбинационные сумматоры КС1–КС3 и логическую схему (ЛС), а также схему сравнения (СС) и логический элемент И. Все структурные элементы МАГФ, кроме ЛС, работают в двоично-десятичном коде.

На выходе МАГФ, т.е. на выходе R_{г5}, формируется последовательность псевдослучайных чисел в соответствии с выражением

$$x_{j+1} = (x_j + x_{j-1} + x_{j-2} + x_{j-3} + a) \bmod m, \quad (1)$$

© В.Н. МАКСИМОВИЧ, О.И. ГАРАСИМЧУК, М.Н. МАНДРОНА, 2017

*Международный научно-технический журнал
«Проблемы управления и информатики», 2017, № 6*

где $x_j, x_{j-1}, x_{j-2}, x_{j-3}$ — числа в регистрах Pr1–Pr4 соответственно, $m = 10^q$, q — количество декад структурных элементов схемы. Значение переменной a определяется логическим уравнением

$$a = (a_{0_0} \oplus a_{0_1} \oplus a_{0_2} \oplus a_{0_3}) \oplus \dots \oplus (a_{q-1_0} \oplus a_{q-1_1} \oplus a_{q-1_2} \oplus a_{q-1_3}), \quad (2)$$

где a_{i_j} ($i = 0, 1, 2, 3$; $j = 0, 1, 2, \dots, q-1$) — значение разрядов двоично-десятичного числа в Pr5. Количество членов уравнения (2) можно выбирать из диапазона $0 \dots 4 \cdot q$.

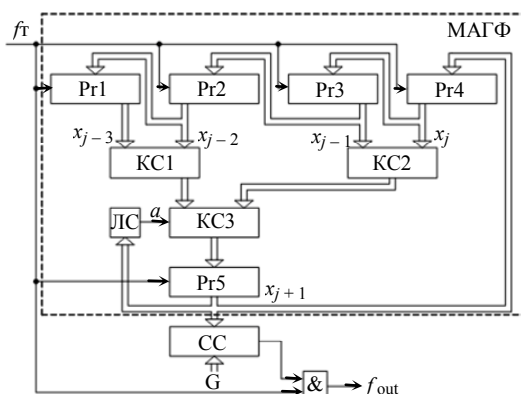


Рис. 1

Теоретическое среднее значение частоты импульсов на выходе ГПИП определяется уравнением [8]

$$f_{out} = \frac{G}{10^q} f_m, \quad (3)$$

где G — управляющий код, который подается на СС для сравнения (1), f_T — частота тактовых импульсов (3).

ГПСЧ, который является основой ГПИП, отличается от классического варианта аддитивного генератора Фибоначчи тем, что в его состав дополнительно введена ЛС [9]. При этом наблюдаются существенные улучшения статистических характеристик последовательности псевдослучайных чисел на выходе ГПСЧ, и в результате — улучшение статистических характеристик выходной последовательности ГПИП. Также наблюдается расширение диапазона значений управляемого кода, при котором статистические характеристики ГПИП удовлетворительны.

Параметры выходного сигнала и внутренние параметры генератора, их взаимосвязь

Основными параметрами выходной импульсной последовательности являются:

- среднее значение частоты f_{out} ;
- диапазон значений f_{out} ;
- шаг изменения частоты $f_{out} - \Delta f_{out}$;
- период повторения импульсной последовательности;
- соответствие импульсной последовательности пуассоновскому закону распределения.

Параметры выходной импульсной последовательности определяются следующими внутренними параметрами генератора (см. рис. 1):

- количеством декад структурных элементов МАГФ;
- начальными установками регистров Rг1–Rг5;
- количеством членов уравнения (2), задействованных при реализации логической схемы ЛС.

Эти три указанные внутренние параметры однозначно определяют:

- период повторения псевдослучайных чисел на выходе МАГФ (выходе Rг5);
- статистические характеристики последовательности чисел на выходе МАГФ.

Исходя из принципа построения ГПИП, можно утверждать, что период повторения выходной импульсной последовательности равен периоду повторения чисел на выходе МАГФ.

Период повторения и статистические характеристики последовательности чисел на выходе МАГФ определяют соответствие выходной импульсной последовательности ГПИП пуассоновскому закону распределения. Однако это соответствие существенно зависит от средней частоты выходной последовательности f_{out} , теоретическое значение которой определяется уравнением (3) и, следовательно, зависит от соотношения значений управляющего кода G и значения 10^q . Действительно, если значение G приближается к значению 10^q , то f_{out} приближается к тактовой частоте f_m , и при таком условии выходная последовательность теряет свои псевдослучайные свойства. С другой стороны, чем меньше частота выходной последовательности f_{out} , тем больший интервал времени нужен для определения ее статистических характеристик. Этот интервал не должен превышать период повторения выходной последовательности. Итак, в принципе (теоретически) выходная импульсная последовательность ГПИП может соответствовать пуассоновскому закону распределения для сколь угодно малых средних значений f_{out} , однако при этом период повторения последовательности должен соответствовать достаточно большой величине. Если среднее значение f_{out} стремится к нулю, период повторения должен стремиться к бесконечности.

Приведенные утверждения имеют практический характер, удовлетворяют большинству случаев применения ГПИП и ниже будут подтверждены конкретными расчетами и результатами моделирования. Теоретически можно рассматривать более общий подход к определению соответствия выходной последовательности пуассоновскому закону распределения с учетом значения средней частоты повторения, периода повторения, времени наблюдения и выбранной методики оценки статистических характеристик. Однако такой подход требует доработки для применения его на практике.

С учетом вышесказанного среднее значение частоты f_{out} , диапазон ее значений и шаг изменения могут быть вычислены теоретически с помощью уравнения (3). Реальные значения этих величин определяются в результате имитационного моделирования или/и экспериментально.

Методика оценки статистических характеристик выходного сигнала

Исследования проводились с помощью обобщенной методики исследования параметров выходной импульсной последовательности ГПИП на соответствие пуассоновскому закону распределения с использованием критерия Пирсона [10].

В соответствии с предложенной методикой поток входных импульсов ГПИП разделяется на n одинаковых групп, каждая из которых состоит из i_{max} импульсов. Максимальное количество групп — n_{max} . Группам входных импульсов соответствуют группы выходных импульсов с числом импульсов $k_1, k_2, \dots, k_{n_{max}}$.

Предложенная методика основывается на классической методике проверки гипотезы о распределении генеральной совокупности по закону Пуассона с использованием критерия Пирсона (критерия χ^2) [10]. При этом, учитывая специфику построения ГПИП, предложены следующие дополнения:

- фиксируется номинальное (теоретическое) среднее значение чисел $k_1, k_2, \dots, k_{n_{\max}} - k_c$ независимо от значения управляющего кода G ;
- значение i_{\max} переменное, зависит от значения G и определяется уравнением

$$i_{\max} = \frac{10^q}{G} k_c. \quad (4)$$

В результате применения методики находим значения χ_c^2 . По таблицам критических точек распределения χ^2 [11], по выбранным уровням значимости α (обычно предоставляют одно из трех значений: 0,1; 0,05; 0,01) и числом степеней свободы k находим критическое значение $\chi_{сч}^2$. Если $\chi_c^2 < \chi_{сч}^2$, нет оснований не принимать гипотезу о соответствии импульсного потока пуассоновскому закону распределения.

При определении статистических характеристик выходного сигнала ГПИП в диапазоне значений управляющего кода G полезно усреднение величин h последних (текущих) значений χ_c^2 . Полученное таким образом значение $\chi_{ссер}^2$ сравнивается с $\chi_{сч}^2$. Усреднения значений χ_c^2 необходимы для определенного «сглаживания» результатов. Исходя из опыта проведения имитационного моделирования, можно выбрать значение $h = 5$, которое при необходимости может быть изменено для более четкого (более интегрального) определения диапазона управляющего кода G , при котором выходная импульсная последовательность соответствует пуассоновскому закону распределения.

При проектировании ГПИП полезно также предварительное определение статистических характеристик последовательности чисел, в данном случае на выходе МАГФ. Это может быть реализовано с помощью стандартных статистических тестов, например NIST [12].

Определение границ диапазона значений управляющего кода

Нижняя G_1 и верхняя G_2 границы значений управляющего кода, при которых статистические характеристики выходной импульсной последовательности соответствуют пуассоновскому закону распределения, могут быть определены исходя из следующего.

Время оценивания последовательности не должно превышать периода ее повторения T_n , т.е. исходя из приведенной выше методики, должно выполняться неравенство

$$i_{\max} \cdot n_{\max} \leq T_n. \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) имеем

$$G \geq \frac{10^q \cdot k_c \cdot n_{\max}}{T_n}, \quad (6)$$

т.е. значение G_1 — наименьшее целое число, удовлетворяющее неравенству (6).

В результате имитационного моделирования ГПИП установлено, что значение G_2 удовлетворяет условию

$$G \leq G_2 = s \cdot 10^q. \quad (7)$$

При этом значение коэффициента s определяется отдельно для конкретного количества декад МАГФ — q , зависит от исходных установок регистров Rr1–Rr5, количества задействованных членов уравнения (2) и при определенных условиях приближается к значению 0,1.

Исследование ГПИП на основе МАГФ при $q = 3$

Определение периода повторения МАГФ. При фиксированном количестве декад МАГФ период повторения псевдослучайной последовательности чисел на его выходе — T_n , а следовательно, и период повторения импульсной последовательности на выходе ГПИП, зависят от количества задействованных членов уравнения (2) и от начальных установок регистров Rr1–Rr5.

Исследования показали, что начальные установки регистров влияют на статистические характеристики исходной последовательности. Ниже приведены найденные в результате имитационного моделирования значения этих установок, при которых статистические характеристики удовлетворительны.

Зависимость периода повторения T_n от количества задействованных членов уравнения (2) существенная. Отдельные результаты, подтверждающие это, приведены в табл. 1. Они получены при таких начальных состояниях регистров Rr1–Rr5, соответственно: 1, 0, 0, 0, 0.

Таблица 1

a	T_n
$a = 0$	18599
$a = a_{0_0}$	18599
$a = a_{0_0} \oplus a_{0_1}$	103404839
$a = a_{0_0} \oplus a_{0_1} \oplus a_{0_2}$	4348679
$a = a_{0_0} \oplus a_{0_1} \oplus a_{0_2} \oplus a_{0_3}$	20121479
$a = a_{0_0} \oplus a_{0_1} \oplus a_{0_2} \oplus a_{0_3} \oplus a_{1_0}$	$> 10^9$
$a = (a_{0_0} \oplus a_{0_1} \oplus a_{0_2} \oplus a_{0_3}) \oplus (a_{1_0} \oplus a_{1_1} \oplus a_{1_2} \oplus a_{1_3}) \oplus (a_{2_0} \oplus a_{2_1} \oplus a_{2_2} \oplus a_{2_3})$	$> 10^9$

Оптимизация выбора уравнения для выходного сигнала ЛС является отдельной частичной задачей, которая требует дополнительных исследований. Ее решение также будет влиять на быстродействие генератора.

Определение статистических характеристик и диапазона значений управляющего кода (при $q = 3$). На рис. 2 приведены результаты исследования статистических характеристик ГПИП на основе МАГФ при $q = 3$.

Здесь использованы следующие обозначения:

- SS_n — значения χ_c^2 ;
- SS_n_{pot} — усредненная величина пяти последних (текущих) значений $\chi_c^2 - \chi_{ссер}^2$;
- level — количество значений $\chi_{ссер}^2$, превышающих $\chi_{сч}^2$.

Результаты получены при следующих значениях параметров методики оценки качества импульсной последовательности: $n_{\max} = 1000$, $k_c = 10$, $\chi_{сч}^2 = 25$.

Выходной сигнал ЛС сформирован по выражению

$$a = (a_{0_0} \oplus a_{0_1} \oplus a_{0_2} \oplus a_{0_3}) \oplus (a_{1_0} \oplus a_{1_1} \oplus a_{1_2} \oplus a_{1_3}) \oplus (a_{2_0} \oplus a_{2_1} \oplus a_{2_2} \oplus a_{2_3}). \quad (8)$$

В результате перебора различных вариантов начальных состояний регистров Rг1–Rг5 установлено, что удовлетворительным является вариант значений этих установок — $G, 0, 0, 0, 0$ соответственно, т.е. вариант, при котором начальные установки зависят от управляющего кода. Именно для таких начальных установок приведены статистические характеристики ГПИП на основе МАГФ ($q = 3$) на рис. 2.

Таким образом, диапазон значений управляющего кода $G - G_1 \div G_2$, при ко-

тором выходная импульсная последовательность соответствует пуассоновскому закону распределения, в данном случае (при $q = 3$) согласно (7) определяется уравнениями

$$G_1 = 1, \quad G_2 = 124.$$

При этом значение $G_1 = 1$, определенное в результате имитационного моделирования, совпадает со значением G_1 , определенным теоретически по выражению (6)

$$G \geq \frac{10^q k_c n_{\max}}{T_n} = \frac{10^3 10 10^3}{10^9} = 10^{-2}.$$

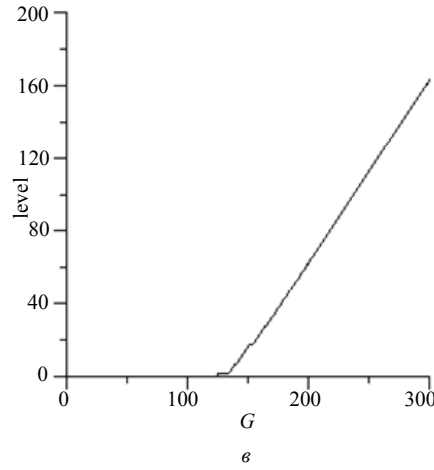
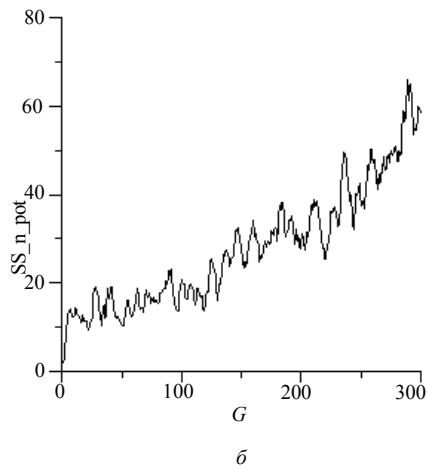
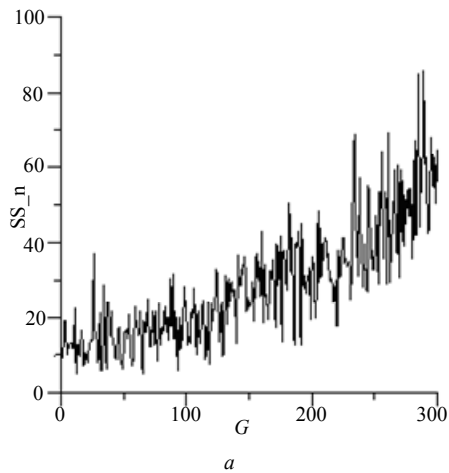


Рис. 2

Зависимость среднего значения частоты выходного сигнала от управляющего кода (при $q = 3$). На рис. 3, а приведена зависимость средней частоты выходной импульсной последовательности ГПИП, на основе МАГФ ($q = 3$) при $\Delta G = 1$ от управляющего кода G , а на рис. 3, б — фрагмент этой зависимости.

Здесь сплошными линиями показаны зависимости, полученные с помощью имитационного моделирования, а пунктирными — теоретические, вычисленные на основе уравнения (3). Сплошная и пунктирная линии на рис. 3, а практически

совпадают. Для конкретизации расчетов принято $f_m = 1000$ Гц. Все реальные зависимости получены при условии формирования выходного сигнала ЛС в соответствии с логическим уравнением (8) и обоснованными выше начальными состояниями Rг1–Rг5: $G, 0, 0, 0, 0$ соответственно.

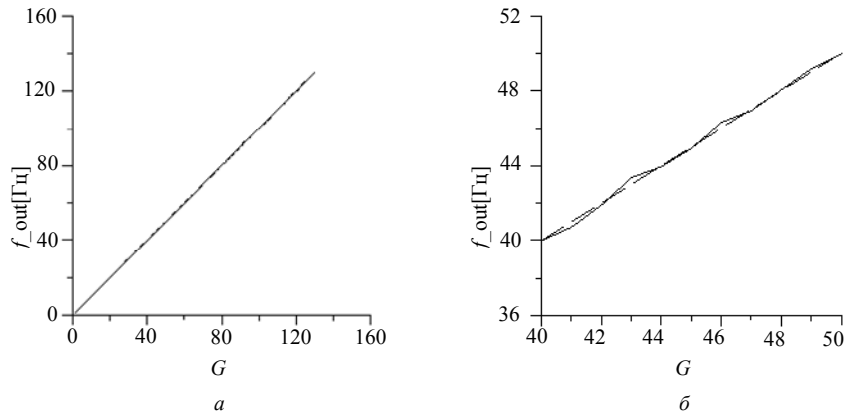


Рис. 3

Итак, зависимости значений средней частоты выходной импульсной последовательности генератора от управляющего кода, полученные в результате имитационного моделирования, близки к теоретическим. Это позволяет на практике при определении средних частот выходного сигнала ГПИП пользоваться уравнением (3).

Исследование ГПИП на основе МАГФ при $q = 6$

Определение периода повторения МАГФ. Зависимость периода повторения T_n от количества задействованных членов уравнения (2) приведена в табл. 2. Она получена при следующих начальных состояниях регистров Rг1–Rг5: 1, 0, 0, 0, 0 соответственно.

Таблица 2

a	T_n
$a = 0$	9255555
$a = a_{0_0}$	4649999
$a = a_{0_0} \oplus a_{0_1}$	$> 10^9$
$a = a_{0_0} \oplus a_{0_1} \oplus a_{0_2}$	$> 10^9$
$a = a_{0_0} \oplus a_{0_1} \oplus a_{0_2} \oplus a_{0_3}$	$> 10^9$
$a = a_{0_0} \oplus a_{0_1} \oplus a_{0_2} \oplus a_{0_3} \oplus a_{1_0}$	$> 10^9$
$a = (a_{0_0} \oplus a_{0_1} \oplus a_{0_2} \oplus a_{0_3}) \oplus (a_{1_0} \oplus a_{1_1} \oplus a_{1_2} \oplus a_{1_3}) \oplus (a_{2_0} \oplus a_{2_1} \oplus a_{2_2} \oplus a_{2_3}) \oplus (a_{3_0} \oplus a_{3_1} \oplus a_{3_2} \oplus a_{3_3}) \oplus (a_{4_0} \oplus a_{4_1} \oplus a_{4_2} \oplus a_{4_3}) \oplus (a_{5_0} \oplus a_{5_1} \oplus a_{5_2} \oplus a_{5_3}) \oplus$	$> 10^{10}$

Определение статистических характеристик и диапазона значений управляющего кода (при $q = 6$). Результаты исследования статистических характеристик ГПИП на основе МАГФ при $q = 6$ приведены на рис. 4.

Результаты получены для тех же значений параметров методики оценки качества импульсной последовательности, что и в предыдущем случае (для $q = 3$):

$$n_{\max} = 1000, k_c = 10, \chi_{сч}^2 = 25.$$

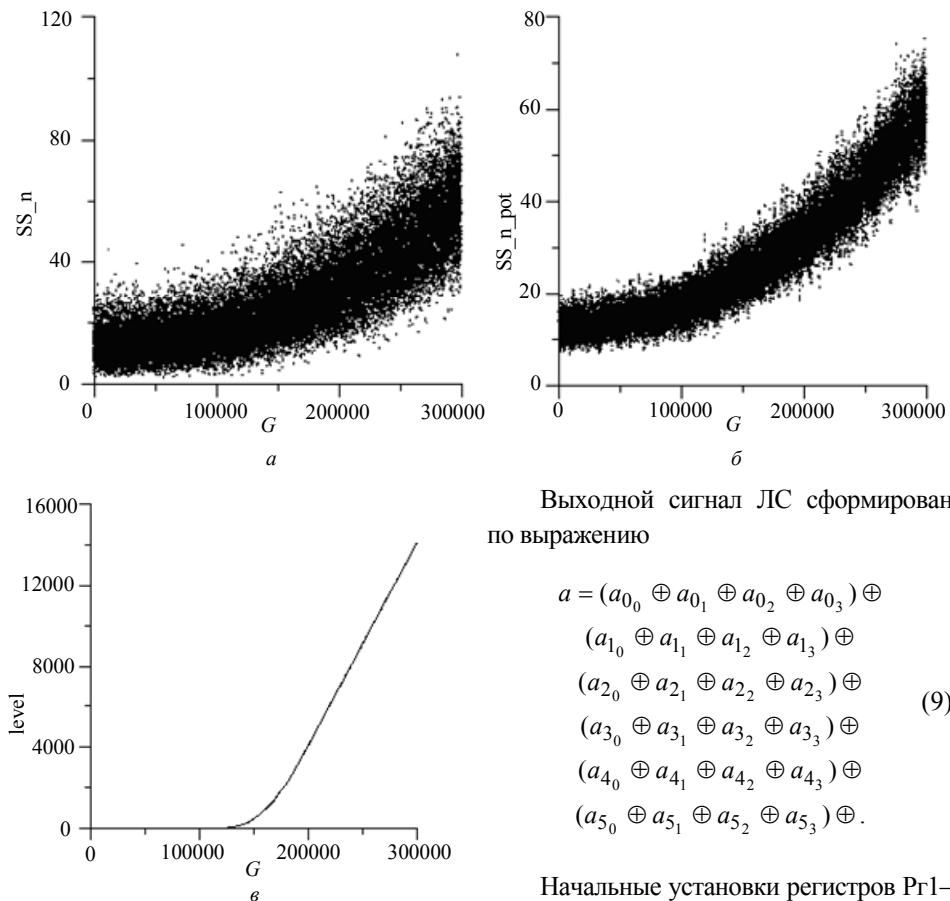


Рис. 4

Диапазон значений управляющего кода $G - G_1 \div G_2$, при котором выходная импульсная последовательность соответствует пуассоновскому закону распределения, в данном случае (при $q = 6$) определяется уравнениями

$$G_1 = 1, G_2 = 111010.$$

При этом значение $G_1 = 1$, определенное в результате имитационного моделирования, совпадает со значением G_1 , определенным теоретически по выражению (6):

$$G \geq \frac{10^q \cdot k_c \cdot n_{\max}}{T_n} = \frac{10^6 \cdot 10 \cdot 10^3}{10^{10}} = 10^0.$$

Зависимость среднего значения частоты выходного сигнала от управляющего кода (при $q = 6$). На рис. 5, а приведена зависимость средней частоты выходной импульсной последовательности ГПИП от управляющего кода G , а на рис. 5, б — ее фрагмент.

Здесь, как и на рис. 3, сплошными линиями показаны зависимости, полученные с помощью имитационного моделирования, а пунктирными — теоретические, полученные на основе уравнения (3). Сплошная и пунктирная линии на рис. 5, а практически совпадают. Было принято $f_m = 1000$ Гц. Все реальные зависимости получены при условии формирования выходного сигнала ЛС

в соответствии с логическим уравнением (9) и обоснованными выше начальными состояниями Pг1–Pг5: $G, 0, 0, 0, 0$ соответственно.

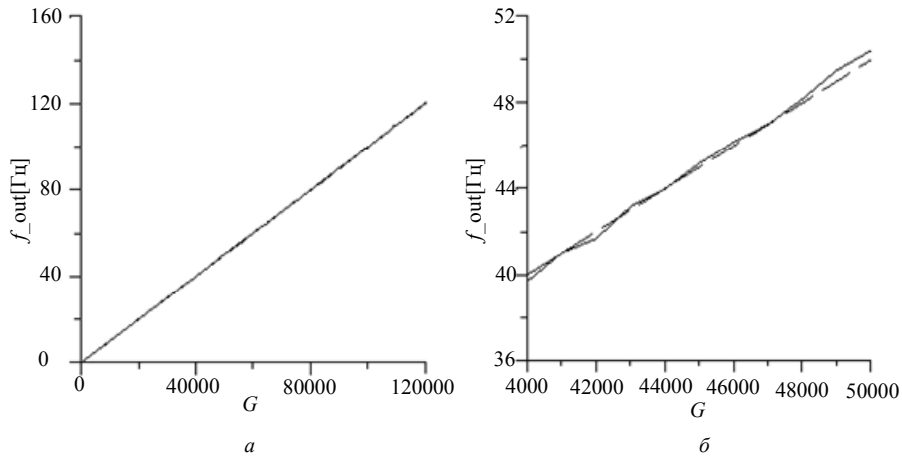


Рис. 5

Принципиальное отличие между зависимостями, представленными на рис. 3 и рис. 5 заключается в том, что они получены при различных значениях шага изменения управляющего кода $G - \Delta G$: на рис. 3 (для $q = 3$) при $\Delta G = 1$, а на рис. 5 (для $q = 6$) при $\Delta G = 1000$.

Уменьшение значения ΔG при $q = 6$ приводит к определенной неоднозначности установки значения средней частоты исходной последовательности ГПИП. Это продемонстрировано на рис. 6, где показаны зависимости, аналогичные зависимостям на рис. 5, при $\Delta G = 100$.

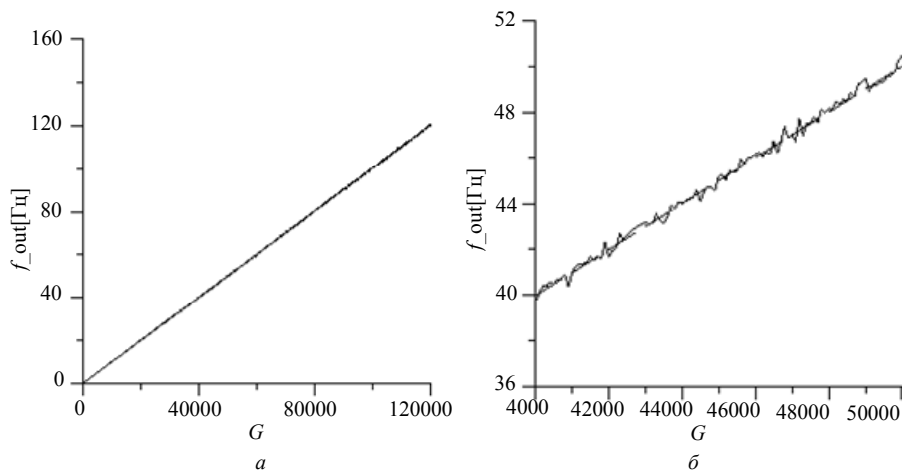


Рис. 6

Сравнение характеристик ГПИП на основе МАГФ при $q = 3$ и $q = 6$.

Увеличение количества декад генератора позволяет существенно увеличить период повторения последовательности чисел на выходе МАГФ, а следовательно, и период импульсной последовательности на выходе ГПИП. Однако это не приводит к автоматическому увеличению «разрешающей способности» генератора относительно установки значения средней частоты исходной последовательности f_{out} , которая фактически задает шаг изменения $f_{out} - \Delta f_{out}$.

Проведенные исследования показывают, что «разрешающая способность» при фиксированном значении количества декад q зависит от начальных установок регистров Rг1–Rг5 и от количества задействованных членов уравнения (2), которое определяет логику формирования сигнала на выходе ЛС. От этих же параметров зависят статистические характеристики исходной последовательности. Отсюда улучшение «разрешающей способности» генератора может быть темой отдельного исследования.

Поскольку увеличение количества декад с $q = 3$ до $q = 6$ при приведенных выше условиях фактически не увеличило «разрешающую способность» ГПИП (не уменьшило Δf_{out}) и не расширило диапазон f_{out} , целесообразно далее рассмотреть возможность практического использования данного генератора при $q = 3$.

Использование ГПИП на основе МАГФ при $q = 3$

На рис. 7 приведена схема генератора пуассоновских импульсных последовательностей, в котором для расширения диапазона средних значений выходной частоты дополнительно введен делитель частоты (ДЧ).

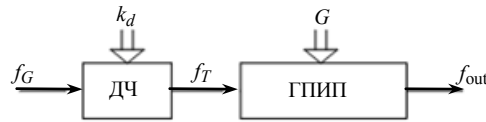


Рис. 7

На выходе ДЧ формируется тактовая импульсная последовательность для ГПИП, частота которой определяется уравнением

$$f_m = \frac{f_g}{k_d},$$

где k_d — коэффициент деления ДЧ, f_g — частота опорного генератора.

В табл. 3 приведены отдельные параметры генератора, представленного на рис. 7, при $f_G = 1\text{МГц}$. ГПИП реализован на основе МАГФ при $q = 3$, а его внутренние параметры с дополнительным ДЧ соответствуют рассмотренным выше: выходной сигнал ЛС сформирован по выражению (8), а начальные состояния регистров Rг1–Rг5 — $G, 0, 0, 0, 0$ соответственно. Это позволяет утверждать, что статистические характеристики выходной импульсной последовательности в приведенных диапазонах значений f_{out} соответствуют пуассоновскому закону распределения.

Таблица 3

k_d	f_m [Гц]	G	f_{out} [Гц]	Δf_{out} [Гц]
1	1000000	1	1000	1000
		2	2000	
		·	·	
		100	100000	
10	100000	1	100	100
		2	200	
		·	·	
		100	10000	
100	10000	1	10	10
		2	20	
		·	·	
		100	1000	

1000	1000	1 2 . . 100	1 2 . . 100	0,1
10000	100	1 2 . . 100	0,1 0,2 . . 10	0,01
100000	10	1 2 . . 100	0,01 0,02 . . 1	0,001
1000000	1	1 2 . . 100	0,001 0,002 . . 0,1	

Заключение

В результате исследований предложена методика определения параметров генератора пуассоновских импульсных последовательностей, которые обеспечивают соответствие статистических характеристик выходной последовательности пуассоновскому закону распределения в широком диапазоне значений средних частот. Исследования выполнены на примере ГПИП с использованием модифицированного аддитивного генератора Фибоначчи. Качество генератора определялось с помощью методики оценки статистических характеристик выходного сигнала, предложенной авторами в предыдущих работах, которая основывается на классической методике проверки гипотезы о распределении генеральной совокупности по закону Пуассона с использованием критерия Пирсона (критерия χ^2) с учетом специфики построения ГПИП.

V.M. Maksymovich, O.I. Garasymchuk, M.M. Mandrona

ПРОЕКТУВАННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ПУАССОНІВСЬКИХ ІМПУЛЬСНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ НА ОСНОВІ АДИТИВНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ФІБОНАЧЧІ

Запропоновано структуру генераторів пуассонівських імпульсних послідовностей на основі модифікованих адитивних генераторів Фібоначчі. Результати їх імітаційного моделювання показують, що статистичні характеристики вихідної імпульсної послідовності відповідають пуассонівському закону розподілу. Визначено границі значень керуючого коду та періоду повторення псевдовипадкової послідовності для конкретних параметрів структурної схеми.

V.N. Maksymovych, O.I. Harasymchuk, M.N. Mandrona

DESIGNING GENERATORS OF POISSON PULSE SEQUENCES BASED ON THE ADDITIVE FIBONACCI GENERATORS

The structures of Poisson pulse sequences generators based on the modified additive Fibonacci generators are proposed. The results of their simulation show, that statistical

characteristics of the output pulse sequence correspond to Poisson distribution law. The values boundaries of control code and the repetition period of the pseudorandom sequence, for concrete parameters of the structuring al circuit scheme, are defined.

1. *Anderson P.A.* Fibonacci-based pseudo-random number generator. — <http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-3586-31> [Accessed on 31 Sep. 2013].
2. *Orue A.B., Montoya F.L.* Hernández encinas: trifork, a new pseudorandom number generator based on Fibonacci maps. // *Journal of computer science and engineering*, — 2010. — 1. — <http://iliasistemas.com/descargas/TRIFORK.pdf> [Accessed on 31 Sep. 2015].
3. *Parker J.D.* The period of the Fibonacci random number generator // *Discrete Applied Mathematics*. — 1988. — N 20. — P. 145–64.
4. *Гарасимчук О.І., Максимович В.М.*, Алгоритм формування пуассонівського імпульсного потоку // *Автоматика, вимірювання та керування*. — 2003. — № 475. — С. 21–25.
5. *Гарасимчук О.І., Дудикевич В.Б., Максимович В.М., Смук Р.Т.* Генератори тестових імпульсних послідовностей для дозиметричних пристроїв // *Теплоенергетика. Інженерія доккілля. Автоматизація*. — 2004. — № 506. — С. 186–192.
6. *Иванов М.А., Чугунков И.В.* Теория, применение и оценка качества генераторов псевдослучайных последовательностей — М. : КУДИЦ — ОБРАЗ, 2003. — 240 с.
7. *Гарасимчук О.І., Максимович В.М.*, Генератори псевдовипадкових чисел, їх застосування, класифікація, основні методи побудови і оцінка якості // *Захист інформації*. — 2003. — № 3. — С. 29–36.
8. *Максимович В., Смук Р., Сторонський Ю., Костів Ю.* Двійково-десятковий генератор пуассонівських імпульсних потоків // *Комп'ютерні технології друкарства*. — 2014. — № 32. — С. 82–89.
9. *Mandrona M.M., Maksymovych V.M.* Investigation of the statistical characteristics of the modified Fibonacci generators // *Journal of Automation and Information Sciences*. — 2014. — 46. — P. 48–53.
10. *Methodology for research of Poisson pulse sequence generators using Pearson's Chi-squared test / Yu.M. Kostiv, V.M. Maksymovych, O.I. Harasymchuk, M.M. Mandrona // Sustainable development : International Journal*. — Varna : Euro-Expert Ltd. — 2013. — N 9. — P. 67–72.
11. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. — М. : Высш. школа, 1999. — 479 с.
12. NIST SP 800-22. — <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs//SP800-22rev1a.pdf> [Accessed: April. 2010].

Получено 30.03.2017
После доработки 19.06.2017