

УДК.621.396

## **Формирователь радиосигналов на базе микросхемы 1879ВМ3**

М.Е. Галашин, Т.В. Лисовская, М.С. Дадашев, М.Ю. Мельников, А.К. Бугайская.

### **Аннотация**

Приводится описание устройства формирования радиосигналов различного вида для имитации реальной радиотехнической обстановки. Формирователь может использоваться при проверке характеристик устройств связи. Описаны, реализованные на формирователе, алгоритмы формирования случайных импульсных потоков для имитации внутрисистемных и преднамеренных помех. Приведена оценка характеристик генерируемых импульсных потоков в сравнении с рассчитанными теоретически.

### **Ключевые слова**

помехоустойчивость; Рэлей; Пуассон; помеха; сигнал

### **Введение**

Формирователь радиосигналов на базе микросхемы 1879ВМ3 предназначен для имитации реальной радиотехнической обстановки в точке приема при проверке характеристик радиотехнических систем связи, отладки алгоритмов обработки сигналов и других применений. Формирователь генерирует совокупность сигналов различного вида, в том числе и импульсные сигналы с различными видами внутриимпульсной модуляции. Параметры сигналов динамически изменяются по заданным законам.

В статье описаны структурная схема и технические характеристики устройства и его отдельных составных частей. Описан алгоритм формирования пуассоновского импульсного потока заданной плотности, а также алгоритм формирования потока импульсов, мощность которых распределена по заданному закону.

### **Описание устройства и принцип работы**

Структурная схема формирователя сигналов показана на рис. 1.

Формирователь сигналов содержит:

- Сигнальный процессор,

- Четыре одинаковых канала, каждый из которых состоит из микросхемы 1879ВМ3, квадратурного модулятора, усилителя и аттенюатора,
- Программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС),
- Синтезатор частоты,
- Сумматор.

Формируемый сигнал рассчитывается сигнальным процессором и записывается в память микросхемы 1879ВМ3 [1], [2], [3], [4], [5]. Сигнальный процессор рассчитывает изменения амплитуды сигнала во времени и управляет аттенюаторами. ПЛИС осуществляет управление синтезатором и 1879ВМ3. В сумматоре сигналы, сформированные в каждом канале, суммируются с входным сигналом и поступают на выход. Одновременно могут формироваться до четырех непрерывных сигналов разных видов. Количество формируемых импульсных сигналов ограничено лишь их параметрами. Чем больше скважность потока импульсов, тем больше сигналов может быть сформировано.

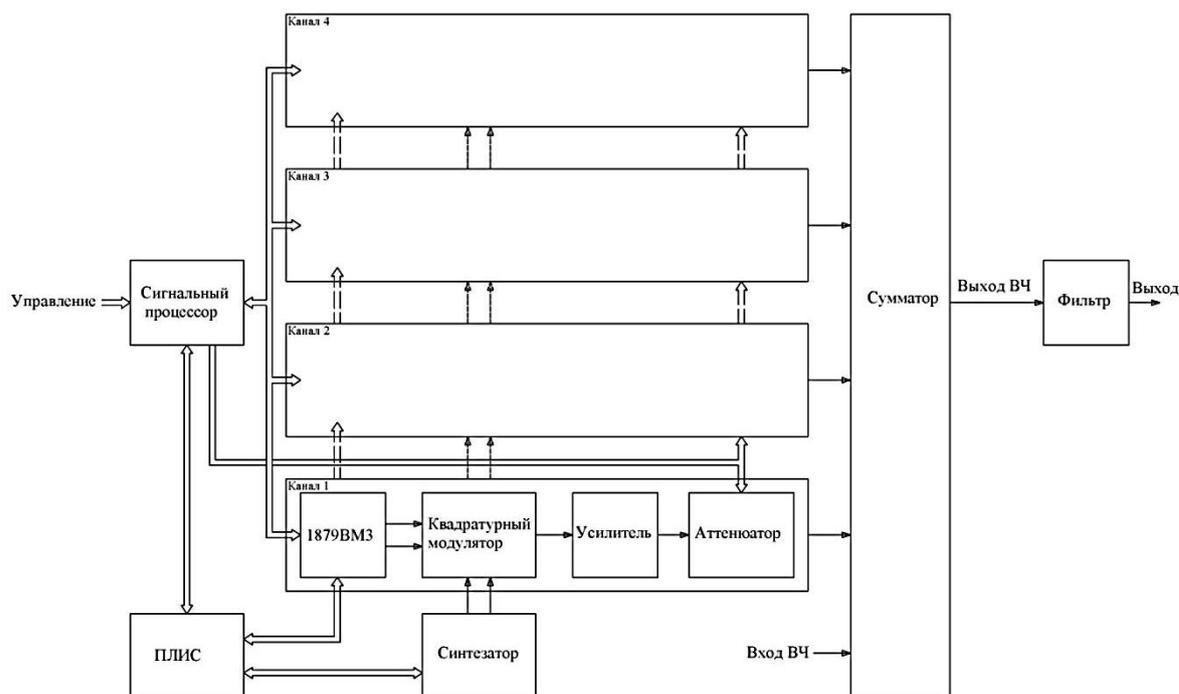


Рис.1 Структурная схема формирователя сигналов

В генерируемых сигналах несущая частота может перестраиваться в полосе работы формирователя с шагом 10 кГц. Амплитуда сигнала может изменяться в диапазоне до 80 дБ. Сигналы могут быть как простыми, так и сложными (с внутренней модуляцией различного вида). Перестраиваемыми параметрами для импульсных сигналов являются: несущая частота, длительность импульса (от 50 нс до нескольких миллисекунд), период следования

импульсов, амплитуда импульса. На формирователе могут быть реализованы такие варианты модуляций, как:

- перестройка несущей частоты от импульса к импульсу,
- перестройка несущей частоты от пачки к пачке,
- вобуляция периода повторения импульсов по различным законам,
- вобуляция длительности импульса по различным законам и др.

Могут быть сформированы шумовые сигналы с полосой от 0,5 МГц до 150 МГц на основе встроенного двоичного генератора псевдослучайной последовательности. Программными методами можно формировать шум с полосой от 1 кГц до 500 кГц.

Построение устройства формирования сигналов позволяет увеличивать количество сигналов для имитации радиотехнической обстановки, путем последовательного соединения одинаковых устройств, как показано на рис. 2.

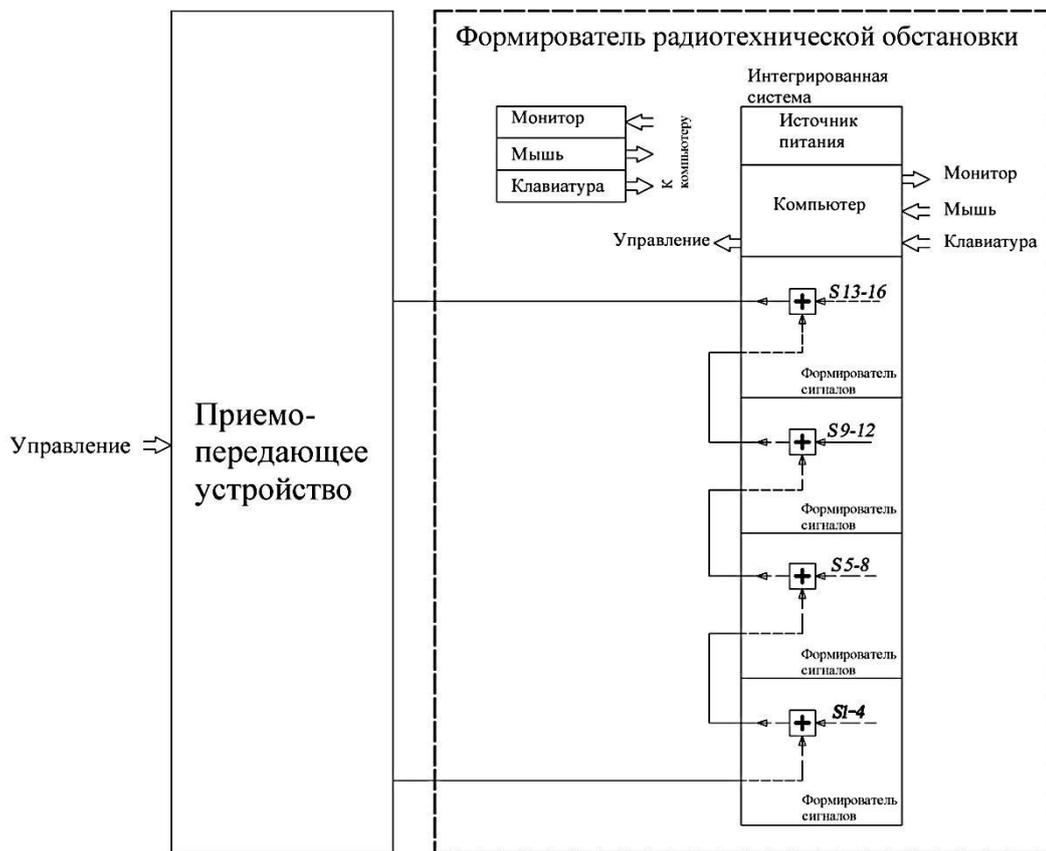


Рис. 2 Устройство формирования радиотехнической обстановки

Основные технические характеристики устройства формирования сигналов приведены в таблице 1.

Название параметра	Значение
Рабочая полоса	150 МГц
Несущая частота	определяется программируемым синтезатором
Динамический диапазон	80 дБ
Выходная мощность (максимальная)	3 дБм
Количество одновременных непрерывных сигналов (максимальное)	до 4
Диапазон возможных длительностей импульсов	от 50 нс до 2 мс с шагом 13,33 нс
Шаг изменения несущей частоты	10 кГц
Диапазон возможных периодов повторения	от 100 нс до 100 мс с шагом 10 нс
Полоса перестраиваемого высокочастотного шума	от 0,5 МГц до 150 МГц
Полоса Доплеровского шума	от 1 кГц до 500 кГц

**Формирование потока сигналов с заданным распределением интервалов времени появления**

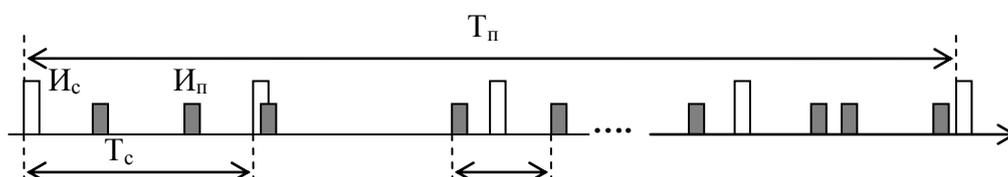


Рис. 3 Поток помеховых импульсов

На рис. 3 серым цветом показан поток импульсов, который может представлять собой внутрисистемные или преднамеренные помехи на интервале наблюдения, равном  $T_p$ . В течение этого времени система связи должна передать пакет сигналов, показанный на рисунке одиночными импульсами белого цвета.

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

$T_p$  – длительность пакета сигнала,

$T_c$  – период следования сигнала,

$\tau_j$  – временной интервал между помеховыми импульсами.

Случайные потоки реальных сигналов подчиняются закону Пуассона [7], [8]. Далее рассматривается формирование межимпульсного интервала  $\tau_j$ , на котором может произойти хотя бы одно событие.

Вероятность появления хотя бы одного события ( $P_1$ ):

$$P_1 = 1 - P_0 = 1 - e^{-\lambda\tau}, \quad (1)$$

Где  $\lambda(t) = \text{const}(t)$  - интенсивность потока или среднее число событий в единицу времени,  $\lambda = N/T_n$ , где  $N$  — число событий, произошедших за время наблюдения  $T_n$ .

Случайная величина  $\tau$  рассчитывается методом обратной функции по формуле (2).

$$\tau = -\left(\frac{1}{\lambda}\right) \cdot \text{Ln}(r) \quad (2)$$

где  $r$  – равномерно распределенная случайная величина на интервале от 0 до 1, которую можно взять из генератора случайных чисел,  $\tau$  – интервал между случайными событиями (случайная величина  $\tau_j$ ). Для определения случайной величины  $r$ , использовался алгоритм генерации случайных чисел «Xorshift», разработанный Джорджем Марсаглием [6]. Преимуществом данного алгоритма является его скорость, так как используются только битовые сдвиги и сложение по модулю 2.

Для проверки была написана программа формирования Пуассоновского потока для сигнального процессора TMS320C6416. В результате работы программы был получен массив межимпульсных интервалов  $\tau$  на интервале времени наблюдения  $T_n = 1$  мс, для разных плотностей потоков импульсов:

- для  $\lambda = 150000$  имп/с, или 0,15 имп/мкс.
- для  $\lambda = 75000$  имп/с, или 0,075 имп/мкс.
- для  $\lambda = 10000$  имп/с, или 0,01 имп/мкс.

На рисунках 4–6 приведены нормированные гистограммы для оценки плотности вероятности случайной величины  $\tau_j$  и теоретически рассчитанные законы распределения плотности вероятности (непрерывная кривая), для различных плотностей потока ( $\lambda=0,15$ ; 0,075; 0,01 имп/мкс). Время наблюдений бралось равным  $T_n = 1$  мс.

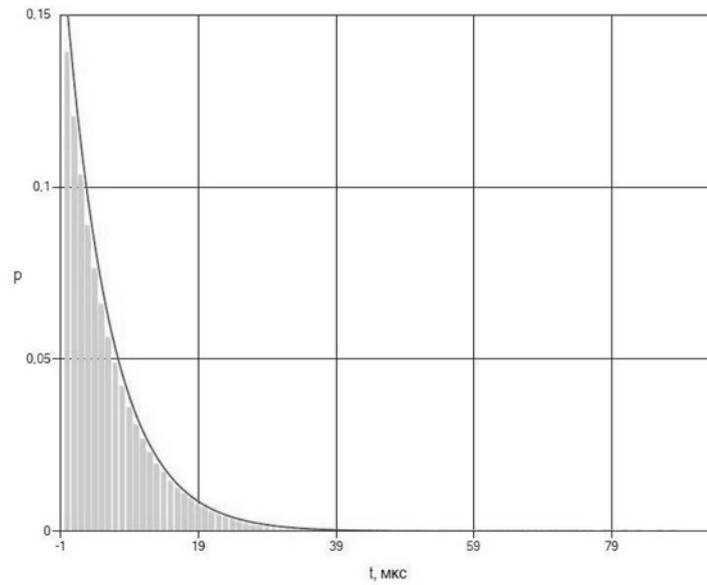


Рис.4 Нормированная гистограмма величины  $\tau_j$  и теоретически рассчитанный закон распределения плотности вероятности величины  $\tau_j$  для  $\lambda=0,15$  имп/мкс.

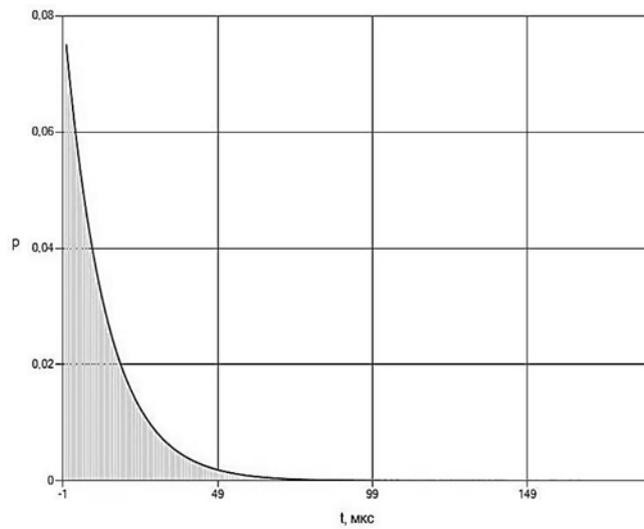


Рис.5 Нормированная гистограмма величины  $\tau_j$  и теоретически рассчитанный закон распределения плотности вероятности величины  $\tau_j$  для  $\lambda=0,075$  имп/мкс.

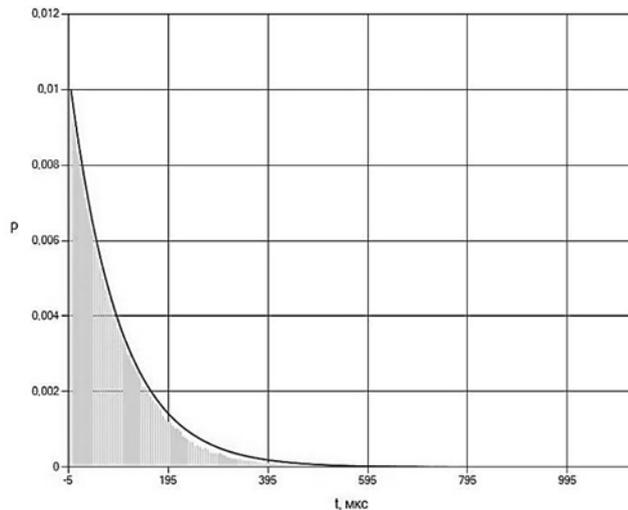


Рис.6 Нормированная гистограмма  $\tau_j$  и теоретически рассчитанный закон распределения плотности вероятности величины  $\tau_j$  для  $\lambda=0,01$  имп/мкс.

Как видно из рисунков 4–6, гистограммы соответствуют теоретическим законам распределения плотности вероятности случайного межимпульсного интервала  $\tau_j$  для соответствующих  $\lambda$ . При этом оценки среднего значения межимпульсного интервала и среднеквадратического отклонения равны  $\tilde{m}_\tau = \tilde{\sigma}_\tau$  соответствуют среднему значению и среднеквадратическому отклонению, рассчитанному теоретически  $m_\tau = \sigma_\tau = 1/\lambda$ .

Результаты расчетов приведены в таблице 2:

Теоретические и оценочные расчеты

Таблица 2

Плотность потока $\lambda$ , имп/мкс	Теоретическое среднее значение $m_\tau$ , мкс	Оценочное среднее значение $\tilde{m}_\tau$ , мкс	Теоретическое СКО $\sigma_\tau$ , мкс	Оценочное СКО $\tilde{\sigma}_\tau$ , мкс
0,15	6,666	6,668	6,666	6,676
0,075	13,333	13,331	13,333	13,328
0,01	100,00	99,70	100,00	99,65

На рисунках 7–9 приведены нормированные гистограммы для оценки вероятности появления  $n$  событий на интервале наблюдения и теоретически рассчитанные вероятности (непрерывная кривая) появления  $n$  событий (импульсов) на интервале наблюдения  $T_n$ , для

различных плотностей потока ( $\lambda = 0,15; 0,075; 0,01$  имп/мкс). Время наблюдений бралось равным  $T_H = 1$  мс.

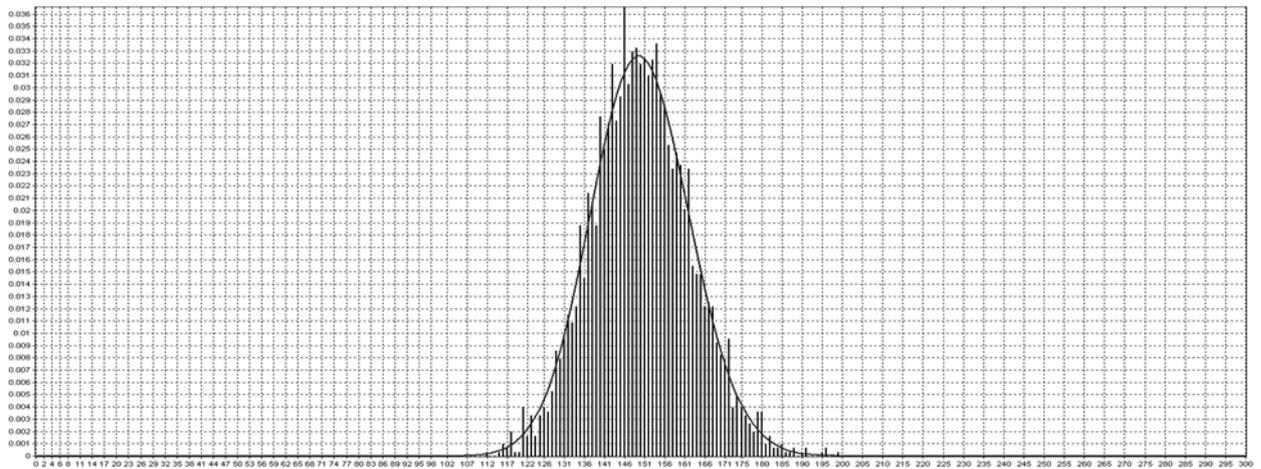


Рис. 7. Нормированная гистограмма и вероятность появления  $n$  событий на интервале  $T_H$  для  $\lambda = 0,15$  имп/мкс.

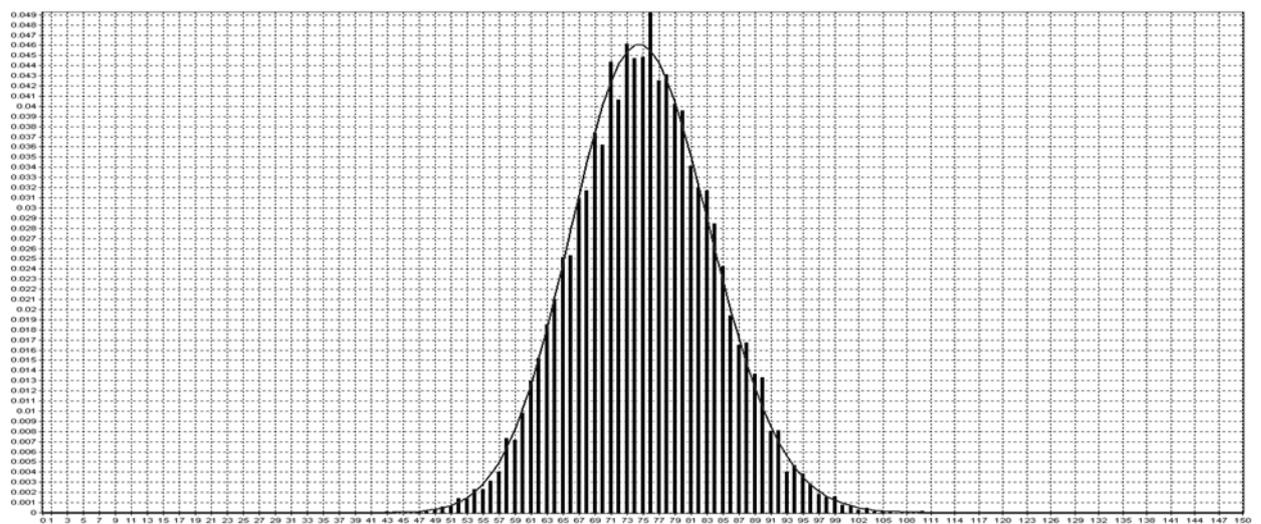


Рис. 8. Нормированная гистограмма и вероятность появления  $n$  событий на интервале  $T_H$  для  $\lambda = 0,075$  имп/мкс.

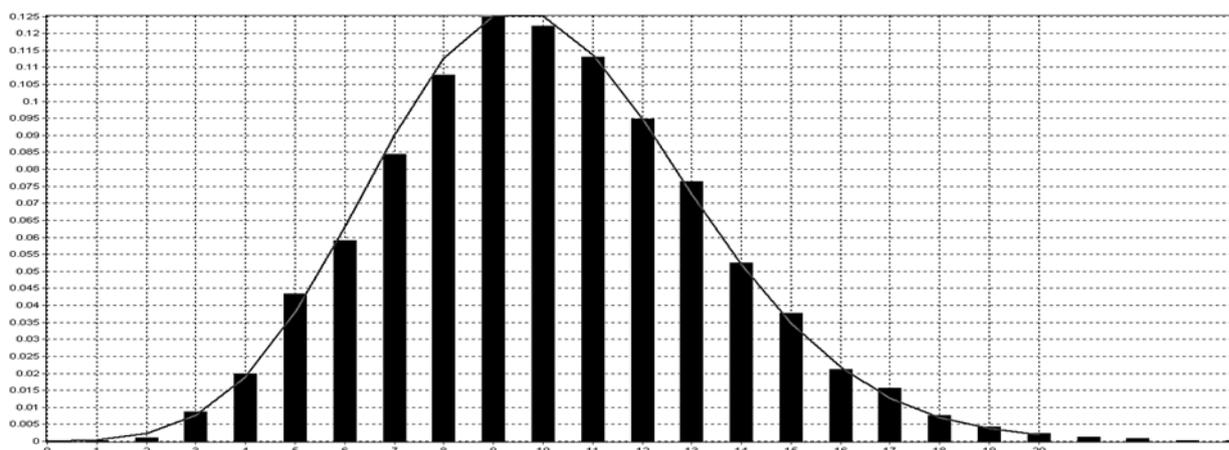


Рис. 9. Нормированная гистограмма и вероятность появления  $n$  событий на интервале  $T_n$  для  $\lambda = 0,01$  имп/мкс.

Результаты расчетов средних значений и дисперсий по формулам и их оценочные значения приведены в таблице 3:

Теоретические и оценочные расчеты

Таблица 3

Плотность потока $\lambda$ , имп/мкс	Теоретическое среднее значение $m_n = \alpha$	Оценочное среднее значение $\tilde{m}_n$	Теоретическое значение дисперсии $D_n = \alpha$	Оценочное значение дисперсии $\tilde{D}_n$
0,15	150	150,25	150,00	150,26
0,075	75,00	75,22	75,00	75,01
0,01	10	10,07	10	10,46

Как видно из рисунков 7 – 9 и таблицы, гистограммы соответствуют теоретически посчитанным вероятностям появления  $n$  событий на интервале наблюдения. При этом оценки среднего значения и дисперсии равны  $\tilde{m}_n = \tilde{D}_n$  и соответствуют среднему значению и дисперсии, рассчитанному теоретически  $m_n = D_n = \alpha = \lambda T_n$ .

Результаты проверки подтверждают, что устройство формирует Пуассоновский поток импульсов.

**Формирование помеховых импульсов, значение мощности которых подчиняется заданному закону распределения.**

Для имитации сигнальной обстановки необходимо формировать поток помеховых импульсов, при этом мощность каждого из этих импульсов должна подчиняться заданному закону распределения.

Управление мощностью формируемого импульса ( $P_u$ ) осуществляется с помощью управляемого аттенюатора (см. рис. 1). С его помощью мощность импульса уменьшается от  $P_{max}$  до минимальной возможного значения мощности  $P_{min}$  с шагом 1 дБ. Случайной величиной, которая управляет мощностью, является коэффициент аттенюации ( $k_{amm}$ ), меняющийся в диапазоне от 0 до -80 дБ. Это приводит к тому, что значение мощности должно пересчитываться в значение коэффициента  $k_{amm}$ . В программе, рассчитывающей значения коэффициента затухания для управления аттенюатором, должен производиться расчет случайной величины  $k_{amm}$ , так, чтобы мощность импульса (в линейном масштабе) изменялась случайным образом в соответствии с заданным законом распределения.

**Расчет коэффициента аттенюации для имитации импульсов, мощность которых  
распределена по закону Рэлея**

Мощность импульса ( $P_u$ ) на выходе формирователя, определяется как:

$$P_u = P_{max} \cdot k \quad (3)$$

где  $P_{max}$  – максимальная мощность импульса.

$k$  – безразмерный коэффициент уменьшения мощности, изменяющийся в диапазоне  $k_{min} \leq k \leq 1$ .

$k_{min}$  – минимальное значение коэффициента  $k$ , определяется исходя из динамического диапазона 80 дБ,  $k_{min} = 10^{-8}$ .

Случайная величина  $k_{атт}$  связана с коэффициентом  $k$  зависимостью:

$$k_{атт} = 10 \lg k, \quad (4)$$

Функция распределения вероятностей для Релеевской случайной величины  $x$  имеет вид [7]:

$$\Phi(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (5)$$

где диапазон изменения случайной величины  $x \in [0; \infty)$ .

Среднее значение  $m_x$ , дисперсия  $D_x$  и  $CKO_x$  соответственно равны:

$$m_x = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma,$$

$$D_x = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \sigma^2,$$

$$CKO_x = \sqrt{\left(2 - \frac{\pi}{2}\right)} \sigma.$$

Для получения выражения функции распределения вероятностей для случайной величины  $k$ , подставим в формулу (5) вместо  $x$  величину  $P_u = P_{\max} \cdot k$  и получим:

$$\Phi(k) = 1 - \exp\left(-\frac{(P_{\max} \cdot k)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

Величину  $\sigma$  определим из следующих соображений:

Диапазон изменения случайной величины  $P_u \in [P_{\min}; P_{\max}]$ .

Интервал разброса случайной величины  $P_u$ :  $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$ . Так как  $P_{\min} = P_{\max} \cdot k_{\min}$ , то

$$\Delta P = P_{\max}(1 - k_{\min})$$

Пусть интервал разброса значений  $P_u$  равен  $n \cdot \text{СКО}$ , тогда

$$\Delta P = P_{\max}(1 - k_{\min}) = n\sqrt{\left(2 - \frac{\pi}{2}\right)}\sigma \quad (7)$$

Из (7) получим выражение для  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{P_{\max}(1 - k_{\min})}{n\sqrt{\left(2 - \frac{\pi}{2}\right)}} \quad (8)$$

Подставляя (8) в (6) получим:

$$\Phi(k) = 1 - \exp\left(-\frac{(P_{\max} \cdot k)^2}{2\left(\frac{P_{\max}(1 - k_{\min})}{n\sqrt{\left(2 - \frac{\pi}{2}\right)}}\right)^2}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{k^2}{\frac{4}{4 - \pi} \cdot \left(\frac{1 - k_{\min}}{n}\right)^2}\right) \quad (9)$$

Из формулы (6) выразим  $k$  через  $k_{amm}$ :

$$k = 10^{\frac{k_{amm}}{10}} \quad (10)$$

Подставляя  $k$  из (10) в (9) получим выражение для функции распределения вероятностей случайной величины  $k_{amm}$ :  $\Phi(k_{amm})$ .

$$\Phi(k_{amm}) = 1 - \exp\left(-\frac{10^{\frac{k_{amm}}{5}}}{\frac{4}{4 - \pi} \cdot \left(\frac{1 - k_{\min}}{n}\right)^2}\right) \quad (11)$$

Из (11) получим выражение для вычисления коэффициента  $k_{amm}$ , который имеет функцию распределения вероятности  $\Phi(k_{amm})$ .

$$k_{amm} = 5\lg(-\ln(1 - \Phi(k_{amm}))) + 10\lg\left(\frac{1 - k_{\min}}{n}\right) + 5\lg\left(\frac{4}{4 - \pi}\right) \quad (12)$$

Обозначим величину  $1 - \Phi(k_{amm}) = r$  (датчик случайных чисел). Так как  $\Phi(k_{amm})$  – это функция распределения вероятностей, то можно считать, что  $r$  равномерно принимает значения в диапазоне  $r \in [0; 1]$  (см. [9]). Учитывая, что последнее слагаемое

$$5\lg\left(\frac{4}{4 - \pi}\right) = 3,341832 \text{ является константой, перепишем формулу (12) в виде:}$$

$$k_{att} = 5\lg(-\ln r) + 10\lg\left(\frac{1 - k_{\min}}{n}\right) + 3,341832 \quad (13)$$

Формула (13) определяет алгоритм формирования случайной величины  $k_{amm}$  на основе равномерно распределенного случайного числа  $r$ .

### Определение функции плотности распределения вероятностей для случайной величины $k_{att}$ .

Плотность распределения вероятности  $\varphi(k_{amm})$  случайной величины  $k_{amm}$

$$\varphi(k_{amm}) = \frac{d\Phi(k_{amm})}{dk_{amm}}$$

Обозначив  $C = \frac{4}{4 - \pi} \cdot \left(\frac{1 - k_{\min}}{n}\right)^2$  получим:

$$\varphi(k_{amm}) = \left(1 - \exp\left(-\frac{10^{\frac{k_{amm}}{5}}}{C}\right)\right)' = \frac{\ln 10}{5C} \cdot 10^{\frac{k_{amm}}{5}} \cdot \exp\left(-\frac{10^{\frac{k_{amm}}{5}}}{C}\right) \quad (14)$$

На рисунке 10 приведены нормированные гистограммы для оценки плотности вероятности случайной величины  $k_{amm}$  и теоретически рассчитанные законы распределения плотности вероятности для  $n = 3, n = 4, n = 7$ . Расчет проводился для следующих данных:

$P_{max} = 1$  Вт,  $N_{ном} = 80000$ ,  $k_{amm\_min} = -80$  дБ. В таблице 4 приведены результаты расчетов для случайной величины  $k_{amm}$ .

Расчеты для случайной величины  $k_{amm}$

Таблица 4

$n$	Оценка среднего значения $\tilde{m}_{k_{att}}$	Оценка дисперсии $\tilde{D}_{k_{att}}$	Оценка среднеквадратического отклонения $\tilde{\sigma}_{k_{att}}$
3	-2,692	7,792	2,791
4	-3,941	7,792	2,791
7	-6,372	7,792	2,791

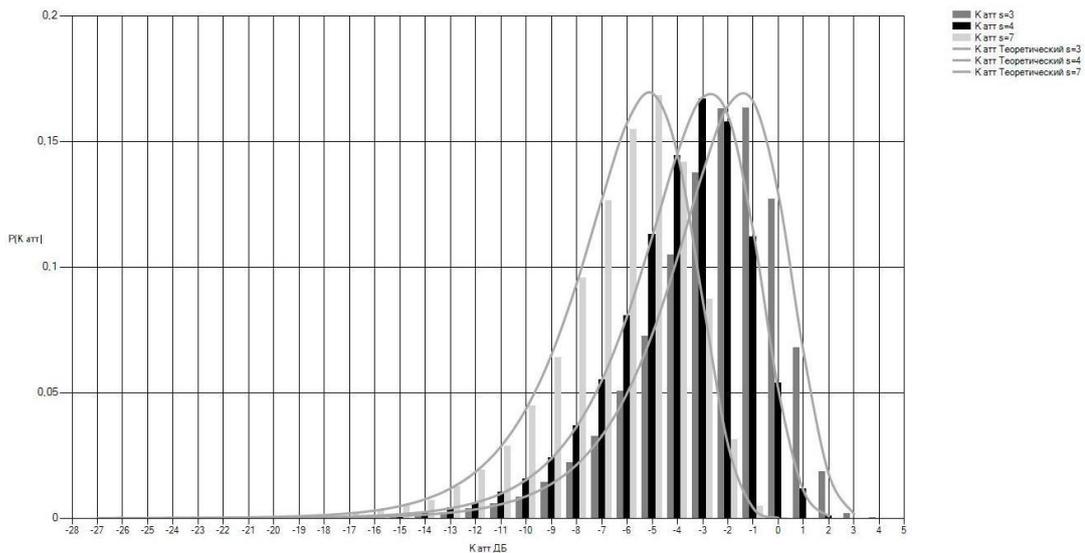


Рис. 10 Нормированные гистограммы  $k_{att}$  и закон распределения плотности вероятности случайной величины  $k_{att}$  для  $n = 3, n = 4, n = 7$ .

На рисунке 11 приведены нормированные гистограммы для оценки плотности вероятности случайной величины  $P_u$  и теоретически рассчитанные законы распределения плотности вероятности случайной величины  $P_u$  (непрерывная кривая) для  $n = 3, n = 4, n = 7$ . Расчет проводился для  $\Delta P = 1$  дБ. В таблице 5 приведены результаты расчетов для случайной величины  $P_u$ .

Расчеты для случайной величины  $P_u$

Таблица 5

$n$	Оценка среднего значения $m_{P_u}$ , дБ	Теоретическое значение дисперсии $D_{P_u}$ , дБ	Оценка дисперсии $D_{P_u}$ , дБ	Теоретическое СКО $\sigma_{P_u}$ , дБ	Оценка СКО $\sigma_{P_u}$ , дБ
3	-1,960	-9,544	-9,549	-4,772	-4,772
4	-3,210	-12,043	-12,048	-6,021	-6,024
7	-5,640	-16,904	-16,909	-8,452	-8,454

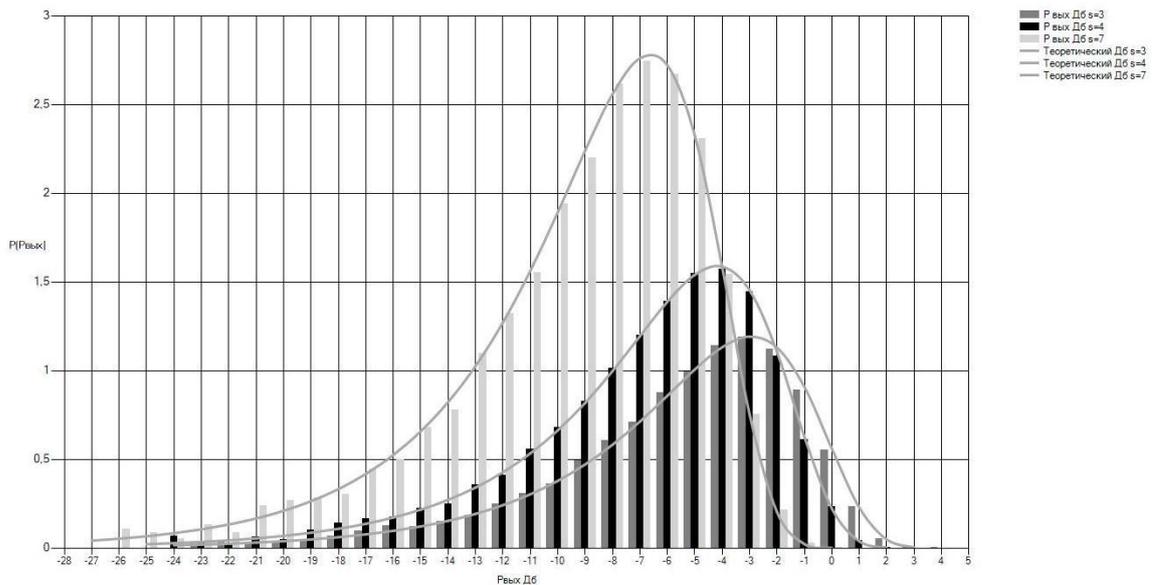


Рис. 11 Нормированные гистограммы  $P_u$  и закон распределения мощности случайной величины  $P_u$  для  $n = 3, n = 4, n = 7$ .

### Заключение

В статье рассмотрено устройство формирования радиосигналов различного вида для имитации реальной радиотехнической обстановки. Описаны структурная схема и технические характеристики устройства формирования радиосигналов и его отдельных составных частей. Подробно описан принцип работы формирователя радиосигналов. Описан алгоритм формирования пуассоновского импульсного потока заданной плотности, а также алгоритм формирования потока импульсов, мощность которых распределена по заданному закону. Приведены результаты моделирования алгоритмов формирования импульсного потока по заданному закону распределения и закону Пуассона, на основании которых можно сделать вывод, что теоретические и практические расчеты совпадают.

### Сведения об авторах

Галашин Михаил Евгеньевич, начальник отдела радиоэлектронных средств ФГУП «ЦНИИ ЭИСУ». Россия, 123104, г. Москва, Тверской бульвар, д. 7/2; тел.: (495) 539-22-49 доб. 15-24;  
e-mail: mgalashin@yandex.ru

Лисовская Тамара Вадимовна, ведущий инженер отдела радиоэлектронных средств ФГУП «ЦНИИ ЭИСУ». Россия, 123104, г. Москва, Тверской бульвар, д. 7/2; тел.: (495) 539-22-49 доб. 15-24;

Дадашев Магомедвели Сийидгусенович, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета). Россия, 123104, г. Москва, Тверской

бульвар, д. 7/2; тел.:8 (926) 324-99-23, 8 (495) 539-22-49 доб. 15-24, e-mail: magomed-d@yandex.ru

Мельников Михаил Юрьевич, инженер 1 категории отдела радиоэлектронных средств ФГУП «ЦНИИ ЭИСУ». Россия, 123104, г. Москва, Тверской бульвар, д. 7/2; тел.:8 (495) 539-22-49 доб. 15-24

Бугайская Анастасия Константиновна, инженер – программист отдела радиоэлектронных средств ФГУП «ЦНИИ ЭИСУ». Россия, 123104, г. Москва, Тверской бульвар, д. 7/2; тел.:8 (495) 539-22-49 доб. 15-24