

Генераторы шума (обзор)

С. А. Винокуров^{1,2,3}, В. Н. Кочемасов¹, А. Р. Сафин^{1,2,3}✉

¹ООО "Радиокомпл", Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

³Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

✉ arsafin@gmail.com

Аннотация

Введение. В настоящее время генераторы шума (генераторы шумовых сигналов) имеют широкий спектр применения. Например, их используют в качестве источников флуктуационных помех при исследовании предельной чувствительности радиоприемных и усилительных устройств, в качестве имитаторов сигнала многоканальной аппаратуры связи, для измерения нелинейных искажений и частотных характеристик радиоустройств с помощью анализаторов спектра.

Цель работы. Обзор мировых достижений в области разработки генераторов шума и их применений.

Материалы и методы. Отбор материала для анализа и обобщения проводился по доступным публикациям в общеизвестных технических журналах, в интернет-магазинах и на сайтах компаний-производителей генераторов шума за последние 60 лет.

Результаты. В статье представлены различные генераторы шума и их характеристики, которые в настоящее время присутствуют на рынке радиоаппаратуры. Проведен анализ основных технических характеристик этих генераторов, а также указаны примеры их практического применения.

Заключение. Генераторы шумовых сигналов имеют широкое применение в научных исследованиях, а производят их в основном зарубежные компании. Отечественные производители на сегодняшний день представлены на этом рынке слабо, а обзорная литература практически отсутствует, несмотря на большие перспективы применения. Многие российские производители начинают вести активные разработки в области создания генераторов шумовых сигналов, что позволит в дальнейшем избежать зависимости от импортной продукции.

Ключевые слова: генераторы шума, шумовой сигнал, спектральная плотность мощности шума, диапазон рабочих частот, коэффициент шума

Для цитирования: Винокуров С. А., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Генераторы шума (обзор) // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 6–32. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-6-32

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования: грант РНФ № 21-79-10396.

Статья поступила в редакцию 11.04.2023; принята к публикации после рецензирования 12.06.2023; опубликована онлайн 28.09.2023

Noise Generators (A Review)

Sergey A. Vinokurov^{1,2,3}, Victor N. Kochemasov¹, Ansar R. Safin^{1,2,3}✉

¹"Radiocomp", Moscow, Russia

²National Research University "MPEI", Moscow, Russia

³Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Moscow, Russia

✉arsafin@gmail.com

Abstract

Introduction. At present, noise generators (noise signal generators) have a wide range of applications. For example, such devices can be used as sources of fluctuating interference when studying the limiting sensitivity of radio receivers and amplifying devices, as signal simulators of multi-channel communication equipment, as tools for measuring non-linear distortions and frequency characteristics of radio devices using spectrum analyzers with a constant bandwidth.

Aim. Review of scientific achievements in the development of noise generators and their applications.

Materials and methods. The material for analysis was collected using databases of scientific publications, online resources, and websites of noise generator manufacturers. The research spanned the timeframe of 60 years.

Results. Various noise generators and their characteristics, currently available on the radio equipment market, are described. The analysis of their main technical characteristics is carried out; examples of their practical application are indicated.

Conclusion. Noise signal generators are widely used in scientific research and are currently produced mainly by foreign companies. Domestic companies are poorly represented in this market, with little published information available. However, positive developments in this direction have recently been observed. Domestic manufacturers are launching R&D programs to develop noise signal generators, which could reduce dependence on imported products in the future.

Keywords: noise generators, noise signal, noise power spectral density, operating frequency range, noise coefficient

For citation: Vinokurov S. A., Kochemasov V. N., Safin A. R. Noise Generators (A Review). Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 6–32. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-6-32

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgment: RFBR grant no. 21-79-10396.

Submitted 11.04.2023; accepted 12.06.2023; published online 28.09.2023

Введение. Шумовой сигнал – это сигнал, мгновенное значение которого меняется во времени по случайному закону (рис. 1). Источники шума в радиоаппаратуре могут быть как внешние, так и внутренние. К внешним источникам относят сеть электропитания, радиостанции, вибрации и т. д. К внутренним источникам относят шум, возникающий в элементах устройств – активных элементах, цепях согласования и т. д. [1]. Шумовой сигнал получают на выходе генератора, в котором формируется колебание с недетерминированным изменением его временной реализации. Такие генераторы называют генераторами шумовых сигналов,

или генераторами шума (ГШ). Таким образом, ГШ представляет собой совокупность компонентов и узлов, обеспечивающих получение шумового сигнала (напряжения, тока или мощности) на нагрузке генератора [1].

Шумовой сигнал в ГШ имеет 2 механизма возникновения: тепловой и дробовой. Тепловой шум возникает в элементах цепи и зависит от их сопротивления и температуры. Дробовой шум возникает в полупроводниковых элементах и связан со случайным движением носителей заряда [2]. В основе генерации шумов лежат элементарные физические процессы (тепловое возбуждение носителей электрического

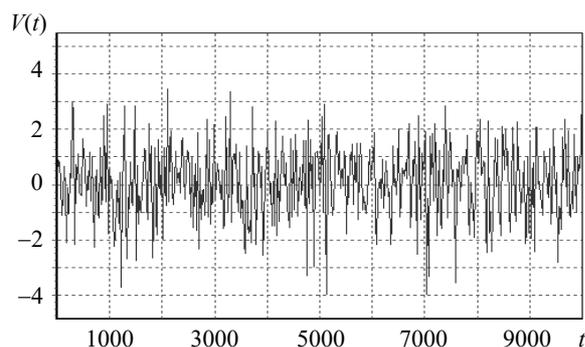


Рис. 1. Временная реализация шумового сигнала на отрезке времени

Fig. 1. Timing implementation of the noise signal in the time span

заряда, его дискретность и др.) и их комбинации. Измеряя характеристики шума, можно по ним определять ряд физических постоянных, например постоянную Больцмана, заряд электрона, подвижность носителей. Одним из методов определения электронной температуры при термоядерных экспериментах является радиоприем и оценка интенсивности ради шумов СВЧ-излучения плазмы [3].

В основе деления ГШ на классы лежат различные характеристики случайных сигналов. Рассмотрим некоторые из возможных классификаций [1]:

- по форме сигнала ГШ делятся на 2 больших класса: генераторы непрерывных (аналоговых) и генераторы дискретных (цифровых) случайных сигналов;

- по частотному диапазону генерируемых сигналов ГШ делятся: на инфранизкочастотные, низкочастотные, высокочастотные и сверхвысокочастотные;

- по ширине полосы генерируемых частот различают узкополосные и широкополосные ГШ.

По характеру спектра шумов можно разделить на 2 типа: широкополосный шум с непрерывным спектром шириной более одной октавы и тональный шум, в спектре которого имеются выраженные тона (одна из трети октавы полос частот превышает остальные не менее, чем на 10 дБ). Широкополосный шум с постоянной спектральной плотностью условно обозначают как "белый".

Кроме того, шум имеет классификацию по форме спектральной плотности мощности шума (СПМШ), обозначаемую "цветом": белый,

розовый (мерцательный), броуновский (красный), синий (голубой), фиолетовый, серый, оранжевый, зеленый и черный. Белый шум является сигнал с равномерной спектральной плотностью во всем частотном диапазоне и дисперсией, равной бесконечности. Является стационарным случайным процессом.

Розовый шум – это сигнал, спектральная плотность которого уменьшается с увеличением частоты. Такой шум можно обнаружить, например, в сердечных ритмах. Красный шум – это сигнал, спектральная плотность которого уменьшается обратно пропорционально квадрату частоты. Синий шум – это шумовой сигнал, чья спектральная плотность увеличивается на 3 дБ/окт по сравнению с красным шумом. Спектр синего шума является зеркальным отображением спектра розового шума. Фиолетовый шум – это сигнал, чья спектральная плотность увеличивается на 6 дБ/окт по сравнению с синим шумом. Серый шум – это сигнал, спектр которого имеет высокие значения на низких и высоких частотах и "провал" на средних частотах. Такой спектр можно получить при сложении спектров броуновского и фиолетового шумов.

Характеристики шумов. Помимо деления шума по спектрам, частоте и форме сигнала, он еще разделяется по плотности распределения вероятности. Распространенными видами шума по форме распределения являются: рэлеевский, гауссовский, экспоненциальный, Эрланга, импульсный и равномерный. Рассмотрим их характеристики подробнее.

Функция распределения Рэля $F(z)$ случайной величины z задается функцией (a, b – константы):

$$F(z) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{(z-a)^2}{b}}, & z \geq a, \\ 0, & z < a. \end{cases}$$

Плотность функции распределения вероятностей шума Рэля задается выражением

$$p(z) = \begin{cases} \frac{2}{b}(z-a)e^{-\frac{(z-a)^2}{b}}, & z \geq a, \\ 0, & z < a. \end{cases}$$

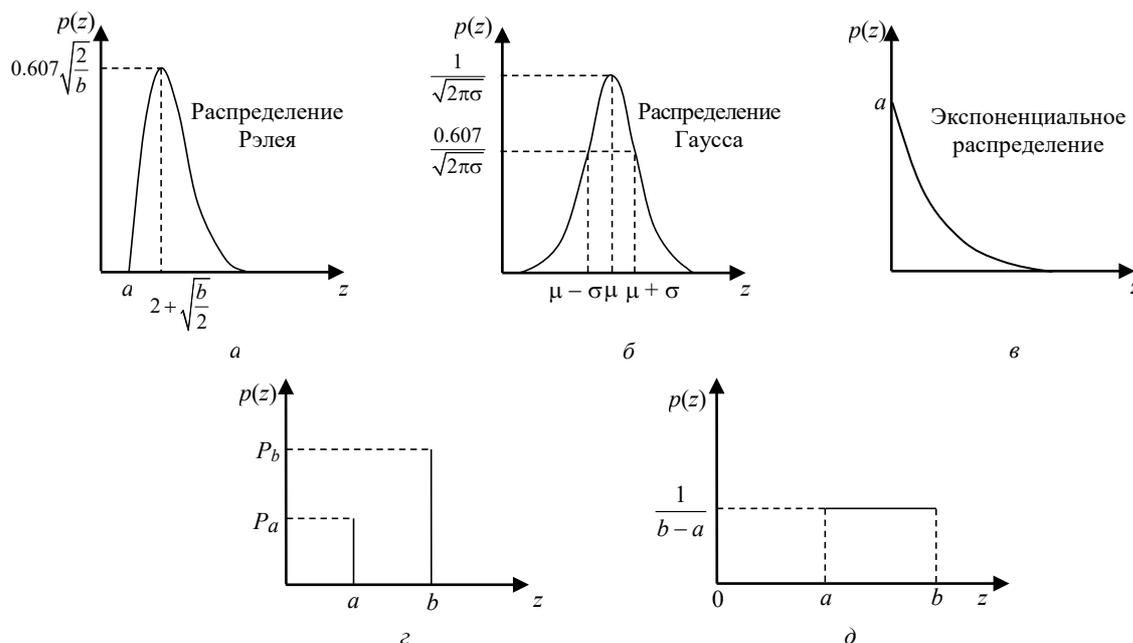


Рис. 2. Функции распределения: а – Рэлея; б – Гаусса; в – экспоненциальное; з – импульсное; д – равномерное
 Fig. 2. Distribution functions: а – Rayleigh; б – Gaussian; в – exponential; з – impulse; д – uniform

График плотности функции распределения Рэлея (рис. 2, а) имеет асимметричную форму. Математическое ожидание и дисперсия равны соответственно:

$$\mu = a + \frac{\sqrt{\pi b}}{2}; \quad \sigma^2 = \frac{b(4 - \pi)}{4}.$$

Шум, характеризующийся случайной величиной z с гауссовской функцией плотности распределения вероятности $f(z)$, имеет следующий вид:

$$f(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z - \mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где μ – математическое ожидание (среднее значение); σ – среднеквадратическое отклонение (σ^2 – дисперсия) распределения (рис. 2, б).

Функция плотности распределения вероятностей экспоненциального шума задается выражением (рис. 2, в)

$$p(z) = \begin{cases} ae^{-az}, & z \geq 0; \\ 0, & z < 0, \end{cases}$$

где $a > 0$ – константа.

Среднее значение и дисперсия для этого распределения имеют вид

$$\mu = \frac{1}{a}; \quad \sigma^2 = \frac{1}{a^2}.$$

Это распределение является частным случаем распределения Эрланга с $b = 1$. Функция плотности распределения вероятностей шума Эрланга определяется как

$$p(z) = \begin{cases} \frac{a^b z^{b-1}}{(b-1)!} e^{-az}, & z \geq 0; \\ 0, & z < 0, \end{cases}$$

где a, b – положительные целые числа.

Математическое ожидание и дисперсия для этого распределения равны:

$$\mu = \frac{b}{a}, \quad \sigma^2 = \frac{b}{a^2}.$$

Функция плотности распределения вероятностей импульсного шума (рис. 2, з) определяется выражением

$$p(z) = \begin{cases} P_a, & z = a; \\ P_b, & z = b; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Функция плотности распределения вероятностей равномерного шума (рис. 2, д) задается выражением



Рис. 3. Функциональная схема ГШ [1]

Fig. 3. Functional diagram of the noise generator (NG) [1]

$$p(z) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq z \leq b; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

При этом математическое ожидание и дисперсия равномерного распределения равны:

$$\mu = \frac{a+b}{2}; \quad \sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{12}.$$

Количественно ГШ чаще всего оценивают по коэффициенту избыточного шума ENR (excess noise ratio) – отношение эффективной температуры входного шума к абсолютной температуре:

$$\text{ENR} = \frac{T_{\text{ex}}}{T_0},$$

где T_{ex} – эффективная температура входного шума; T_0 – абсолютная температура (290 К).

Данный параметр измеряется в децибелах и используется для определения среднего уровня собственных шумов в заданной полосе или для сравнения средних уровней собственных шумов разных ГШ в одной полосе.

Генераторы шума и область их применения. ГШ отличаются исключительным разнообразием используемых при их построении элементов. Это объясняется, с одной стороны, широким выбором первичных источников шума, а с другой – исключительным многообразием практических требований к самим генераторам. При выполнении ГШ используются различные схемотехнические решения, а их детальное рассмотрение позволяет получить обобщенную функциональную схему ГШ (рис. 3).

В схему входит аттенюатор, первичный источник шума, широкополосный усилитель, формирующее устройство, калиброванный делитель или ослабитель, измеритель мощности.

Первичными источниками шума в XX в. чаще всего служили газоразрядные элементы (тиратроны, неоновые лампы, аргоновые и неоновые трубки и др.), так как они обладают большой мощностью шума в достаточно широкой полосе частот от несколько мегагерц до СВЧ-диапазона [4]. В настоящее время в качестве первичного источника используются резисторы, полупроводниковые элементы, шумовые диоды, фотоэлектронные умножители (рис. 4) и другие приборы [5].

С помощью формирующего устройства производится выделение нужного спектра частот с заданным распределением спектра мощности шума или осуществляется преобразование одного вида шума в другой, например узкополосного нормального шума в рэлеевский.

Для того чтобы сравнивать усилители, преобразователи частоты и другие устройства по минимальному коэффициенту шума, необходимо иметь возможность изменять входное сопротивление ГШ. Эту функцию в них выполняет переключатель выходного сопротивления [2].

ГШ находят различное применение в лабораторной и заводской практике. Спектральный состав шумовых сигналов на выходе ГШ, как правило, равномерен в очень широкой полосе частот [7].

Шумовые генераторы перекрывают диапазон от весьма низких частот до самых высоких,



Рис. 4. Фотоэлектронный умножитель ФЭУ-22 [6]

Fig. 4. Photomultiplier ФЭУ -22 [6]

применяемых в настоящее время. Они надежны, конструктивно просты, обладают стабильностью, удовлетворяющей требованиям практики. Они универсальны в том отношении, что позволяют в ряде частных применений с помощью сравнительно простых средств преобразовывать шумы с одним законом распределения мгновенных значений в шумы с иными законами распределения мгновенных значений или преобразовать флуктуационные сигналы с одним спектральным составом в шумовые колебания с другим частотным спектром [8].

Наибольшее применение ГШ находят в измерительных устройствах, в качестве источников, воспроизводящих шумы, которые наблюдаются в реальных схемах и системах. Примерами таких измерительных устройств могут быть многочисленные генераторы, предназначенные для измерения коэффициента шума приемников, а также систем автоматического регулирования и телеуправления, предельной дальности радиолокационных станций и радионавигационных систем [2].

ГШ используются также в качестве калиброванных источников мощности, применяемых при измерениях интенсивности других шумов или регулярных сигналов, например шумов внеземного происхождения (в радиоастрономии), атмосферных помех и др.

В радиосвязи ГШ применяются для измерения помех. В многоканальной телефонии полный сигнал на выходе модулятора очень похож на шум, занимающий ту же полосу частот, поэтому при тестировании несколько сотен источников звука заменяют одним широкополосным источником шума. Шум с исключенными составляющими спектра частот проверяемого канала подается на линию связи, а на испытываемом канале измеряется напряжение помехи. Подобные измерения производятся в проводной связи и в радиосвязи, особенно на радиорелейных линиях. Такие измерения позволили установить допустимые уровни перекрестных помех [1].

Разнообразно применение ГШ в электроакустике. В частности, в аудиометрии шумы используются для маскировки звуков при определении разборчивости речи. ГШ применяют для снятия частотных характеристик микрофонов, громкоговорителей и электроакустических

преобразователей, для измерения времени реверберации помещений, коэффициентов звукопоглощения различных перегородок, стен, звукопоглощающих материалов и др. В устройствах звукозаписи ГШ оказались полезными для установления уровней записи и воспроизведения одновременно в широком диапазоне амплитуд и частот.

В цеховой практике на радиозаводах ГШ используются для контроля действующей полосы пропускания различных радиоустройств и фильтров, непосредственного измерения коэффициента шума в процессе отладки и выпуска усилителей на лампах или транзисторах, так как коэффициентом шума определяется предельная чувствительность прибора. Коэффициент шума от одного образца прибора к другому может отличаться весьма заметным образом. Кроме того, ГШ применяются при разбраковке транзисторов, поскольку коэффициент шума полупроводникового элемента непосредственно связан с надежностью его работы. В соединении с избирательным перестраиваемым усилителем ГШ может служить источником почти синусоидальных сигналов в широком диапазоне частот [9].

В некоторых случаях ГШ могут оказаться полезными при определении условий механических резонансов системы. Постоянное стремление к проверке конструируемого оборудования в условиях, близких к реальным, заставило сконструировать и применять "шумовые" вибростенды, амплитуда вибраций которых меняется непрерывно по случайному закону, а выходной сигнал содержит в своем составе не единственный гармонический сигнал, а целый спектр сигналов, средняя суммарная мощность которых достигает нескольких десятков киловатт.

Наконец, ГШ входят как самостоятельные узлы в комбинированные измерительные приборы, в генераторы хаотических импульсных помех. Они незаменимы в биофизике при различных опытах по определению пороговых уровней зрения, слуха и др.

Хорошо известен метод измерения параметров как отдельных антенн, так и больших антенных систем с помощью источников внеземного радиоизлучения. Последние имеют относительно небольшие угловые размеры, т. е. являются практически точечными источника-

ми, и служат во время антенных измерений в качестве "вынесенных" естественных радиопередатчиков. Положение радиоисточников на небесной сфере, их движение и интенсивность известны с большой точностью. Это позволяет юстировать электрическую ось антенны, измерять ее диаграмму направленности, коэффициент усиления, эффективную площадь, шумовую температуру, коэффициент полезного действия и другие параметры [10].

При этом ГШ можно использовать в информационной безопасности как средство защиты, а также для скрытой передачи данных [11]. Один из распространенных примеров – защита от прослушивающих устройств. Для этого ГШ может быть реализован в различном виде:

- радиопередатчик, который транслирует шум в диапазоне частот передающих устройств, например как сотовый телефон, Wi-Fi и т. д.;
- устройство с динамиком, который за счет шумовых характеристик формирует звуковой шум и тем самым заглушает переговоры в помещении.

Представленный беглый перечень некоторых применений ГШ с годами будет все многообразнее и полнее. Как правило, ГШ необходимо внедрять там, где приходится иметь дело с анализом частотных характеристик. Применение шумовых генераторов позволяет автоматизировать целый ряд ручных операций электронной и радиотехнической промышленности.

Шумовые диоды. В настоящее время основным источником шума в ГШ является полупроводниковый шумовой диод, лавинно-пролетный диод (ЛПД), вакуумный шумовой диод или микросхема с источником шума и усилителем сигнала.

Полупроводниковый шумовой диод – это диод, который является источником шума с заданной плотностью спектра и с заданным диапазоном частот. Процесс ударной ионизации в

начале стадии лавинного пробоя неустойчив. Он начинается и обрывается, а после вновь начинается в тех местах перехода, где в данный момент достаточен уровень напряжения электрического поля.

Результатом неравномерной случайной генерации новых носителей заряда при ударной ионизации являются шумы.

Лавинно-пролетный диод – это полупроводниковый СВЧ-диод, в котором появление новых носителей заряда происходит за счет лавинного умножения в области перехода. При определенных условиях взаимодействие носителей с переменным полем в переходе обеспечивает возникновение отрицательного дифференциального сопротивления, что позволяет применять ЛПД для создания генераторов и усилителей.

Вакуумный диод применяется как источник дробового шума. В основном конструкция представляет собой диодную вакуумную трубку с пластиной (анод) и нагретой нитью накала, которая является катодом диода. Температура катода определяет ток анода, который задает дробовой шум. Анодное напряжение устанавливается весьма большим, чтобы собрать все электроны, испускаемые нитью накала.

Шумовые диоды серии NC100/200/300/400 фирмы NoiseCom (рис. 5, а) применяют в аудиоаппаратуре и используют в микроволно-

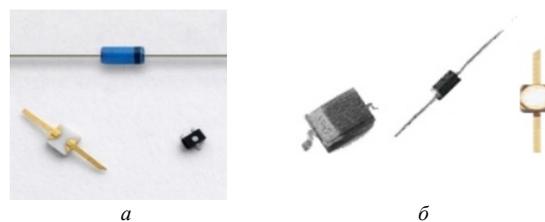


Рис. 5. Шумовые диоды: а – серии NC100/200/300/400 фирмы NoiseCom; б – серии NW100/200/300/400 фирмы NoiseWave

Fig. 5. Noise diodes: а – NC100/200/300/400 series by NoiseCom; б – NW100/200/300/400 series by NoiseWave

Табл. 1. Технические параметры шумовых диодов

Tab. 1. Technical parameters of noise diodes

Производитель	Модель	Диапазон частот
NoiseCom	Серии NC1XX	От 0.1 Гц...100 кГц до 0.1 Гц...3 МГц
NoiseCom	Серии NC2XX	От 0.1 Гц...10 МГц до 0.1 Гц...100 МГц
NoiseCom	Серии NC3XX	От 10 Гц...3 ГГц до 10 МГц...11 ГГц
NoiseCom	Серии NC4XX	От 100 МГц...18 ГГц до 1 ГГц...110 ГГц
NoiseWave	Серии NW1XX	От 0.1 Гц...100 кГц до 0.1 Гц...2 МГц
NoiseWave	Серии NW2XX	От 0.1 Гц...10 МГц до 0.1 Гц...100 МГц
NoiseWave	Серии NW3XX	От 10 Гц...3 ГГц до 10 МГц...11 ГГц
NoiseWave	Серии NW4XX	От 10 МГц...18 ГГц до 10 МГц...40 ГГц

вых приемниках (табл. 1). Импеданс сигнала серий NC300 и NC400 составляет 10...20 Ом при постоянном смещении диода [12].

Шумовые диоды NoiseWave серии NW100/200/300/400 (рис. 5, б) обеспечивают симметричное распределение напряжения белого гауссовского шума при сохранении одинаковой спектральной плотности мощности в зависимости от частотной характеристики (табл. 1). Эти диоды применяют: для испытания оборудования, увеличения динамического диапазона аналого-цифровых преобразователей, в качестве источника широкополосной мощности [13].

Шумовые диоды серии NC100/200/300/400 и NW100/200/300/400 при общем рассмотрении имеют схожую характеристику, но в каждой серии свои преимущества. Серия NC100/200/300/400 имеет большой выбор диодов, и максимальная рабочая частота достигает 110 ГГц. Серия NW100/200/300/400 имеет широкий диапазон частот (включая мега- и гигагерцовый), при этом спад показателя ENR незначителен.

Модульные генераторы шума. Модульные ГШ сквозного и поверхностного монтажа. Шумовые диоды являются неотъемлемой частью ГШ. Вместе с тем в ряде практических применений удобнее использовать модульные ГШ (рис. 6), которые, в отличие от диодов, имеют большую вариативность. Их можно разделить как по виду генерации шума, так и по типам самих модульных ГШ и диапазонам частот.

Модульный ГШ серии NC500/500SM фирмы NoiseCom (табл. 2) представлен на рис. 6, а. Шумовые модули серий NC500 (сквозной монтаж) и NC500SM (поверхностный монтаж) являются хорошим решением для тестирующих



Рис. 6. Модульные ГШ поверхностного и сквозного монтажа: а – серии NC500/500SM фирмы NoiseCom; б – серии NC2000/4000 фирмы NoiseCom и серии NW-D фирмы NoiseWave

Fig. 6. Modular NGs of surface and through-hole mounting: а – NC500/500SM series by NoiseCom; б – NC2000/4000 series by NoiseCom and series NW-D by NoiseWave

устройств. Данные модули обеспечивают чрезвычайно стабильную выходную мощность при изменении температуры и напряжения [14]. Коэффициент шума на выходе составляет 31 дБ. Области применения этих шумовых модулей включают: тестирование оборудования, измерители уровня сигнала для сотовой связи, ПК, калибраторы, анализаторы спектра, приемники радиолокационного предупреждения.

Широкополосные шумовые модули серии NC2000/4000 фирмы NoiseCom (табл. 3) представлены на рис. 6, б. Модули серии NC2000 размещены в 24 или 14 контактных корпусах [15]. Модули серии NC4000 размещены в 40-контактном модуле, который охватывает те же диапазоны шума, что и NC2000, но имеют более высокий уровень выходного сигнала.

Применения для модулей NoiseWave серии NW-D (табл. 3) включают: встроенное тестовое оборудование, сглаживание для увеличения динамического диапазона аналого-цифровых преобразователей, а также для тестирования частоты битовых ошибок [16]. Устройства поставляются в стандартных 14- или 24-контактных корпусах.

Табл. 2. Технические параметры модульных ГШ с коаксиальными соединителями

Tab. 2. Technical parameters of modular NG with coaxial connectors

Производитель	Модель	Диапазон частот, ГГц	ENR, дБ
NoiseCom	NC3404	2...4	30...36
NoiseCom	NC3405	4...8	30...35
NoiseCom	NC3406	8...12	28...33
NoiseCom	NC3407	12...18	26...32
Narda-ATM	NX1502R	0.01...1.6	-15.5
Narda-ATM	NX3202S	–	22
Narda-ATM	Серии NX1500X	От 1...2 до 12...18	-15.5
Narda-ATM	Серии NX3212Y	–	26...35

Табл. 3. Технические параметры модульных ГШ

Tab. 3. Technical parameters of modular NG

Производитель	Модель	Диапазон частот	Мощность, дБм	Допустимое отклонение коэффициента шума на выходе, дБ
NoiseCom	Серии NC5XX	200 кГц...5 ГГц	5	±3.0
NoiseCom	NC2201	100 Гц...20 кГц	5	±0.75
NoiseCom	NC2401	1 МГц...500 МГц	0	±1.0
NoiseCom	NC2601	1 МГц...2 ГГц	-5	±2.0
NoiseWave	NW100M-D	1 МГц...100 МГц	5	±1.0
NoiseWave	NW300M-D	10 МГц...300 МГц	0	±1.0
NoiseWave	NW3G-D	10 МГц...3 ГГц	-5	±2.0

Модульные ГШ серий NC500/500SM, NC2000/4000 и NW-D при общем рассмотрении имеют схожие параметры, но в каждой серии свои преимущества и недостатки. Серия NC500/500SM имеет большой выбор устройств и широкий диапазон частот, максимальная рабочая частота достигает 5 ГГц, но наблюдается более высокая погрешность. Серия NC2000/4000 имеет неплохой диапазон частот с более низкой погрешностью, но обладает малой плотностью шума. Серия NW-D имеет более высокую плотность шума, относительно малую погрешность и обладает достаточно широким диапазоном, но максимальная рабочая частота не превышает 3 ГГц.

Модульный ГШ с коаксиальными соединителями. Модульные ГШ NoiseCom серии NC3400 (см. табл. 2) являются экранированными ГШ и применяются для радиометрических и радиолокационных систем (рис. 7, а). Точность калибровки ГШ серии NC3400 повышается благодаря низкому коэффициенту стоячей волны по напряжению (КСВН), равному 1.3:1 [17]. Встроенный изолятор обеспечивает почти постоянное выходное сопротивление при

включении и выключении смещения источника шума. Соединитель SMA является стандартным для радиочастотного выхода, а соединитель BNC – стандартным для входа смещения.

Модульные ГШ Narda-ATM серии NX150X и NX320X (см. табл. 2) обеспечивают белый шум с гауссовским распределением вероятности для радиочастотных систем (рис. 7, б). Они обладают долговременной стабильностью, надежностью и могут работать в широком диапазоне температур [18]. Изделие Narda-ATM представляет собой генератор микроволнового шума, который может использоваться в различных приложениях, включая измерение уровня



Рис. 7. Модульные ГШ с коаксиальными соединителями: а – серии NC3400 фирмы NoiseCom; б – серии NX1500 и NX3200 фирмы Narda-ATM

Fig. 7. Modular NG with coaxial connectors: а – NC3400 series from NoiseCom; б – NX1500 series and NX3200 from Narda-ATM

Табл. 4. Технические параметры модульных ГШ

Tab. 4. Technical parameters of modular NG

Производитель	Модель	Диапазон частот	ENR, дБ
Micronetics Wireless	Серии CI6XX	От 1.20...1.40 до 6.90...7.80 ГГц	28.0...36.0
Micronetics Wireless	Серии CI7XX	От 7.50...9.00 до 8.40...10.00 ГГц	36.0
Micronetics Wireless	Серии CI8XX	От 8.50...9.60 до 11.50...12.40 ГГц	36.0
Micronetics Wireless	Серии CI901	От 1.50...2.00 до 8.00...12.40 ГГц	32.0...36.0
NoiseWave	NW2G-30-CS	10 кГц...2 ГГц	30
NoiseWave	NW3G-15-CS	100 кГц...3 ГГц	30
NoiseWave	NW6G-26-CS	10 МГц...6 ГГц	26
NoiseWave	NW18G-23-CS	1 ГГц...18 ГГц	23
NoiseWave	NW18G40-22-CS	18 ГГц...40 ГГц	22
Micronetics Wireless	NMA-2413	10 МГц...4 ГГц	78
Micronetics Wireless	NMA-2414	100 МГц...6 ГГц	74
Micronetics Wireless	NMA-2415	30 МГц...3 ГГц	78
Micronetics Wireless	NMA-2416	7.8 ГГц...8.5 ГГц	74
Micronetics Wireless	NMA-2417	2 ГГц...8.0 ГГц	74

шума, подавление помех в военных целях и самотестирование радаров и других систем.

Линейку модульных ГШ серии C16XX/7XX/8XX/9XX производит компания Micronetics Wireless (табл. 4). Эти серии ГШ включают узкополосные и широкополосные устройства как в коаксиальной (C16XX, C17XX и C18XX), так и в волноводной (C19XX) конфигурациях [19]. Миниатюрный размер, быстрое время переключения и прочная конструкция делают их хорошо подходящими для встроенного тестового применения в радиолокации, авионике, радиоастрономии, электронных средствах противодействия и системах связи.

Модульные ГШ Ceuear серии 1660X обладают преимуществами: широким спектром частот от 10 МГц до 50 ГГц, малым КСВН, равным 1.30:1 [20]. Они оснащены цифровым датчиком температуры, удобны для автоматического мониторинга изменения температуры окружающей среды и используются для коррекции температуры при измерении показателя шума и повышения точности измерений (рис. 8, а). Источник шума и анализатор уровня шума используются вместе, чтобы обеспечить комплексное решение для измерения уровня шума на микроволновых частотах миллиметровых волн.

Модульные ГШ NoiseWave серии NW-CS – это широкополосные модульные ГШ (табл. 4), идеально подходящие для измерения уровня шума и различных встроенных тестовых приложений (рис. 8, б). Эти продукты отличаются высокой выходной мощностью [21].

Модульные ГШ Rohde & Schwarz серии R&S®FS-SNS (рис. 8, в) применяются для измерения уровня шума и усиления. Точность измерения обеспечивается за счет сохранения необходимых параметров для измерений, их загрузки, а также учета температуры окружа-

ющей среды, которая способна повлиять на исследуемые параметры. Погрешность измерения ГШ способна вычислить в автоматическом режиме и вывести результат на подключенный экран монитора. ГШ работает в диапазоне частот от 10 МГц до 110 ГГц, а показатель ENR варьируется в диапазоне от 5 до 21 дБ [22].

Модульные ГШ Keysight Technologies серии 346X (рис. 8, г) являются широкополосными ГШ с малой погрешностью. Диапазон частот от 10 МГц до 26.5 ГГц, ENR варьируется от 4.5 до 17 дБ. Применяются для измерения коэффициента шума. За счет широкого диапазона частот эти ГШ позволяют выполнить измерения в разных полосах частот без использования нескольких ГШ [23].

ГШ ERAVANT модели STZ-08-01 представляет собой источник шума, который обеспечивает номинальный уровень ENR 14 дБ в диапазоне частот от 90 до 140 ГГц. Источник шума может работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах [24].

Шумовой модуль Micronetics Wireless серии NMA-24XX (табл. 4) идеально подходит для таких применений, как подавление помех и встроенные тесты, где требуются высокая мощность и небольшие размеры [25]. Встроенный регулируемый драйвер обеспечивает долговременный высокостабильный уровень шума.

Модульные ГШ с коаксиальными соединителями серии NC3400, NX150X, NX320X, C16XX/7XX/8XX/9XX, 1660X, NW-CS и NMA-24XX при общем рассмотрении имеют множество отличительных параметров, но в каждой серии можно выделить свои преимущества и недостатки. Серия NC3400 имеет самую малую погрешность, но обладает не таким широким диапазоном частот. Серии NX150X и NX320X имеют схожие параметры,



Рис. 8. Модульные ГШ с коаксиальными соединителями: а – серии 1660X фирмы Ceuear; б – ГШ серии NW-CS фирмы NoiseWave; в – серии R&S®FS-SNS фирмы Rohde & Schwarz; г – серии 346X фирмы Keysight Technologies

Fig. 8. Modular NG with coaxial connectors: а – 1660X series from Ceuear; б – NW-CS series NG from NoiseWave; в – R&S®FS-SNS series from Rohde & Schwarz; г – 346X series from Keysight Technologies

Табл. 5. Технические параметры волноводных ГШ

Tab. 5. Technical parameters of waveguide NG

Производитель	Модель	Диапазон частот, ГГц	ENR, дБ
NoiseCom	NC5242A	18...26.5	25
NoiseCom	NC5428A	26.5...40	6
NoiseCom	NC5222A	33...50	21
NoiseCom	NC5115A	50...75	15.5
NoiseCom	NC5112A	60...90	15
NoiseCom	NC5110A	75...110	15
Farran Technology	WG-NS-28	26.5...40	15
Farran Technology	WG-NS-22	33...50	14
Farran Technology	WG-NS-19	40...60	13
Farran Technology	WG-NS-15	50...75	13
Farran Technology	WG-NS-12	60...90	13
Farran Technology	WG-NS-10	75...110	12
Farran Technology	WG-NS-08	90...140	12
Farran Technology	WG-NS-06	110...170	12
СКАРД	МН2640	26...40	15...16
СКАРД	МН3350	33...50	15...16
СКАРД	МН4060	40...60	15...17
СКАРД	МН5075	50...75	14...17

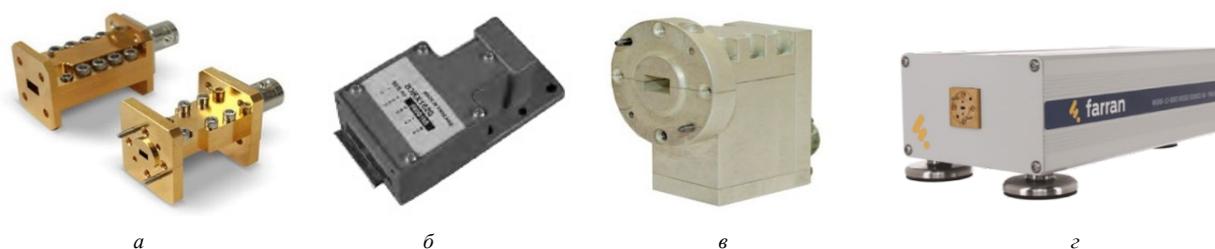


Рис. 9. Волноводные генераторы шума: а – серии NC5XXXX фирмы NoiseCom; б – серии B3NG16 фирмы Teledyne e2v; в – серии МН фирмы СКАРД; г – серии WG-NS фирмы Farran Technology

Fig. 9. Waveguide noise generators: а – NC5XXXX series from NoiseCom; б – series B3NG16 from Teledyne e2v; в – МН series from SCARD; г – WG-NS series by Farran Technology

малый шаг перестройки частоты. Серия CI6XX/7XX/8XX/9XX обладает большим выбором устройств и стабильным значением ENR. Серия 1660X имеет большой диапазон частот, и максимальная рабочая частота достигает 50 ГГц. Серия NW-CS имеет широкий диапазон частот, но более высокую погрешность. У серии NC2000/4000 неплохой диапазон частот и более низкая погрешность. Серия NMA-24XX обладает большим значением ENR, высокой плотностью шума, но имеет большую погрешность.

Волноводные ГШ. Волноводные ГШ серии NC5XXXX от NoiseCom (табл. 5) отличаются высокой стабильностью и скоростью переключения, отсутствием паразитных пульсаций (рис. 9, а). Пульсации на выходе источников шума оказывают прямое влияние на точность измерений, поэтому NoiseCom адаптировала характеристики серии NC5XXXX таким обра-

зом, чтобы пульсации были минимизированы во всем диапазоне частот [26].

Модульные ГШ Teledyne e2v серии B3NG16 имеют диапазон частот от 8.8 до 9.5 ГГц с коэффициентом шума на выходе 15 дБ [27]. Такие ГШ также могут использоваться в качестве датчиков мощности для обеспечения контроля системы (рис. 9, б).

Волноводные ГШ Российской компании СКАРД серии МН (рис. 9, в) предназначены для проверки работоспособности и проведения калибровки СВЧ-трактов приемных каналов (табл. 5), малошумящих усилителей и преобразователей частоты в миллиметровом диапазоне длин волн [28].

Источники шума Farran Technology серии WG-NS (рис. 9, г) обеспечивают равномерный уровень плотности мощности шума во всем диапазоне частот волновода (табл. 5). Источники доступны в восьми волноводных диапазо-

нах, охватывающих частоты 26.4...170 ГГц [29]. В качестве основного источника шума здесь используется кремниевый лавинный диод. Высокая стабильность устройств позволяет использовать их для испытаний и контрольно-измерительных приборов. Низкие требования к питанию постоянным током устранили необходимость в сложных источниках питания высокого напряжения.

Волноводный ГШ Keysight Technologies серии Q347B работает в диапазоне частот от 33 до 50 ГГц, ENR варьируется от 9 до 17 дБ. Применяется для измерения коэффициента шума и усиления. ГШ обеспечивает подачу высокоточного широкополосного шума и высокую временную стабильность ENR, что позволяет получить более точные измерения [30].

ГШ ERAVANT модели STZ-19-11 представляет собой волноводный источник шума на основе кремниевого ИМПАТТ-диода. Номинальный уровень ENR равен 13 дБ, диапазон частот от 40 до 60 ГГц. Источник шума интегрирован с изолятором Фарадея для улучшения КСВН, что обеспечивает более надежное и точное измерение уровня шума [31].

ГШ ERAVANT модели STZ-22-11 представляет собой волноводный источник шума в диапазоне частот от 33 до 50 ГГц, который обеспечивает ENR, равный 13 дБ. Источник шума интегрирован с высококачественным изолятором Фарадея SAGE Millimeter (STF-22-S1) для улучшения КСВН для более надежных и точных измерений уровня шума. Источник шума может работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Эта функция также может быть использована в автоматических тестовых системах для удаленного включения и выключения источника шума [32].

Волноводные ГШ серий NC5XXXA, B3NG16, МН и WG-NS при общем рассмотрении имеют множество отличительных парамет-

ров, но в каждой серии можно выделить свои преимущества. Серия NC5XXXA имеет большой выбор устройств, но обладает относительно высокой погрешностью и большим разбросом значений параметра ENR. Серия B3NG16 имеет малый шаг перестройки и малую погрешность, но весьма узкий диапазон частот. Серия МН обладает более стабильным значением ENR при достаточно неплохом диапазоне частот. Серия WG-NS имеет максимальную рабочую частоту в 170 ГГц, широкий диапазон частот и относительно небольшую погрешность, но обладает большими габаритами и массой.

Модульные генераторы шума повышенной мощности. Модульные ГШ повышенной мощности имеют большее значение амплитуды выходного сигнала по сравнению с обычными шумовыми модулями. Увеличение параметров амплитуды происходит за счет усилителя, который встроен в корпус модульного ГШ. Данное усиление необходимо в случае широкого диапазона шума, так как мощность выходного сигнала широкополосного генератора имеет недопустимо малое значение.

Модульные ГШ NoiseCom серии NC11XX и NC11XXA (рис. 10, а) генерируют шум мощностью до +13 дБм и имеют полосу пропускания до 18 ГГц (табл. 6). Модули высокой мощности предназначены для проверки помехоустойчивости оборудования кабельного те-

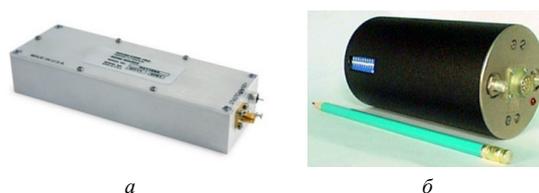


Рис. 10. Модульные генераторы шума повышенной мощности: а – серии NC11XX и NC11XXA фирмы NoiseCom; б – серии PNS-XX фирмы ELVA-1

Fig. 10. Modular noise generators of increased power: а – NC11XX and NC11XXA series from NoiseCom; б – PNS-XX series by ELVA-1

Табл. 6. Технические параметры модульных ГШ повышенной мощности

Tab. 6. Technical parameters of high-power modular NG

Производитель	Модель	Диапазон частот
NoiseCom	Серии NC11XX	От 10 Гц...20 кГц до 100 Гц...1 ГГц
NoiseCom	Серии NC11XXA	100 Гц...18 ГГц
ELVA-1	PNS-28	26.6...40 ГГц
ELVA-1	PNS-10	75...110 ГГц
ELVA-1	PNS-08	90...120 ГГц
ELVA-1	PNS-06	120...140 ГГц

левидения, защищенных каналов связи и военных систем подавления помех. Модули с меньшей выходной мощностью (≤ 0 дБм) являются источниками случайного дрожания [33], которое также применяется при тестировании оборудования.

Модульные ГШ ELVA-1 серии PNS-XX (рис. 10, б) используют специально разработанные кремниевые лавинные диоды, работающие в импульсном режиме (табл. 6). Они обеспечивают реальное некогерентное излучение в пределах полосы пропускания 5 ГГц [34]. Уровень выходной мощности 1 Вт позволяет использовать устройство для подсветки целей и повышения чувствительности пассивных радиометров. Источники доступны для всех частот от 26 до 140 ГГц. Низкие требования ГШ к питанию постоянным током устраняют необходимость в сложных источниках питания высокого напряжения. Устройства снабжены источниками импульсного тока. Предусмотрены как внешние, так и внутренние режимы запуска. Встроенный генератор с цифровым управлением позволяет устанавливать частоту повторения в диапазоне от 10 Гц до 100 кГц.

Модульные ГШ повышенной мощности серий NC11XX, NC11XXA и PNS-XX при общем рассмотрении имеют множество отличительных параметров, но в каждой серии можно выделить преимущества. Серии NC11XX и NC11XXA имеют большой диапазон частот (от герц до гигагерц), большой выбор устройств, а также более высокую плотность шума, но обладают относительно большой погрешностью и относительно малой максимальной рабочей частотой. Серия PNS-XX обладает большим диапазоном частот в области гигагерц и имеет относительно малую погрешность.

Калиброванные генераторы шума. Калиброванные ГШ имеют точную регулировку выходного сигнала и, кроме того, обладают высокой стабильностью коэффициента шума на выходе во всем рабочем диапазоне частот. Такие модульные ГШ применяются для измерения шумовых характеристик радиоаппаратуры. Это происходит за счет особенности калиброванного ГШ, которая позволяет убрать зависимость от точных вольтметров и фильтров.

Модульные ГШ серии NC3000 фирмы NoiseCom (табл. 7) обеспечивают высокую стабильность при изменениях температуры и напряжения [35]. Они хорошо подходят для тестирования приемников, измерения уровня шума и любых приложений, требующих широкой полосы пропускания и быстрого переключения.

Серия NC3000 включает в себя ГШ NC3100 с выходной мощностью избыточного коэффициента шума 15 дБ для измерителей уровня шума, а также источники шума высокой мощности серии NC3200 с коэффициентами шума от 26 до 35 дБ для тестирования систем радиолокации и спутниковой связи (рис. 11, а).

Калиброванные ГШ ELVA-1 серии ISSN-XX (рис. 11, б) обеспечивают равномерный уровень спектральной плотности мощности



Рис. 11. Калиброванные генераторы шума: а – серии NC3000 фирмы NoiseCom; б – серии ISSN-XX фирмы ELVA-1

Fig. 11. Calibrated noise generators: а – NC3000 series from NoiseCom; б – ISSN-XX series

Табл. 7. Технические параметры калибровочных ГШ

Tab. 7. Technical parameters of calibration NG

Производитель	Модель	Диапазон частот, ГГц	ENR, дБ
NoiseCom	Серии NC3100	От 0.01...8 до 0.5...18	15.5
NoiseCom	Серии NC3200	От 0.01...1 до 2...110	15...35
ELVA-1	Серии ISSN-XX	26.6...170	15...12
NoiseWave	NW2.7G3.1-30-CS-I	2.7...3.1	30...35
NoiseWave	NW3.7G4.2-30-CS-I	3.7...4.2	30...35
NoiseWave	NW5.4G5.9-30-CS-I	5.4...5.9	30...35
NoiseWave	NW7.2G8.4-30-CS-I	7.2...8.4	30...35
NoiseWave	NW10.7G12.7-30-CS-I	10.7...12.7	30...35
NoiseWave	NW17.7G21.2-32-CS-I	17.7...21.2	32...37
NoiseWave	NW27G30-32-CS-I	27...30	32...37

шума во всем диапазоне частот волновода [36]. Такие ГШ доступны в восьми волноводных диапазонах, охватывающих частоты 26.4...170 ГГц (табл. 7).

В качестве основного элемента в ГШ используются кремниевые лавинные диоды. Низкие требования к питанию постоянным током устраняют необходимость в сложных источниках питания высокого напряжения. Устройства могут работать в непрерывном и импульсном режимах АМ с частотой модуляции до 1 кГц.

Калиброванные ГШ NoiseWave серии NW-CS-I – это широкополосные источники шума (табл. 7), идеально подходящие для измерения уровня шума и различных встроенных тестовых приложений [37].

Калиброванные ГШ серий NC3000, ISSN-XX и NW-CS-I при общем рассмотрении имеют множество отличительных параметров, но в каждой серии можно выделить преимущества и недостатки. Серия NC3000 имеет большой диапазон частот, большой выбор устройств, но обладает не лучшим параметром погрешности. Серия ISSN-XX имеет максимальную частоту работы в 170 ГГц, но обладает относительно большой погрешностью. Серия NW-CS-I имеет малую погрешность и широкий диапазон, но максимальная частота работы достигает 30 ГГц, а также не покрывает весь диапазон частот от 1.4 до 30 ГГц.

Генераторы шума в приборном исполнении. Модульные ГШ имеют широкий спектр применений, но не всегда удобны в использова-

нии, например при быстром проведении лабораторных испытаний. В этих случаях используются ГШ в приборном исполнении. В ГШ для создания шумовых сигналов применяют шумовые диоды или модульные ГШ. Приборным ГШ в лабораторных условиях удобнее управлять и регулировать выходную мощность сигнала. Такие ГШ применяют для внешнего подключения к стендам и лабораторным установкам.

С цифровым управлением. Управление выходными параметрами ГШ в приборном исполнении с цифровым управлением происходит при помощи сенсорного дисплея или кнопок на передней панели корпуса изделия. Через сенсор или кнопки электронный сигнал поступает на плату управления изделия. От этой платы, в зависимости от поступивших сигналов, идет изменение параметров ГШ и вывод информации о параметрах генератора на цифровой экран изделия. ГШ с цифровым управлением имеет программное обеспечение.

Приборы NoiseCom серии PNG7XXXX (табл. 8) генерируют белый гауссовский шум (рис. 12, а). Выходная мощность сигнала равняется 3 дБм, а допустимое отклонение составляет ± 0.25 дБ на 40 МГц [38].

ГШ NoiseCom серии CNG-EbNo – это полностью автоматизированные приборы (табл. 8), которые устанавливают и поддерживают высокоточное соотношение между несущей (рис. 12, а) и добавленным шумом в широком диапазоне уровней мощности сигнала и частот [39]. CNG-EbNo предоставляют инженерам-

Табл. 8. Технические параметры ГШ в приборном исполнении

Tab. 8. Technical parameters of NG in the instrument version

Производитель	Модель	Диапазон частот
NoiseCom	Серии PNG7XXXX	10 МГц...2 ГГц
NoiseCom	Серия J7XXXX	10 МГц...30 ГГц
NoiseCom	Серии CNG-EbNo	50 МГц...22 ГГц
NoiseCom	Серия UFX7XXXX	10 Гц...1 ГГц



а



б

Рис. 12. Генератор шума в приборном исполнении с цифровым управлением: а – серии PNG7XXXX, CNG-EbNo, JV9XXX и J7XXXX фирмы NoiseCom; б – серии CNG фирмы dBm

Fig. 12. Noise generator in instrument design with digital control: а – PNG7XXXX, CNG-EbNo, JV9XXX and J7XXXX series from NoiseCom; б – CNG series by dBm

системщикам, проектировщикам и испытателям в области сотовой, персональной, спутниковой и военной связи экономически эффективные средства за счет автоматизированного тестирования, а также повышения уверенности в повторяемости и точности результатов тестирования.

Приборы серии JV9XXX компании NoiseCom (см. рис. 12, а) представляют собой генераторы, разработанные для подачи сигналов шума и детерминированного джиттера на линию подачи питания [40]. Встроенный в изделия ГШ обеспечивает мощность широкополосного шума на уровне 0 дБм или более в диапазоне от 500 Гц до 2 ГГц с ослаблением до 127 дБ, регулируемым с шагом 0.1 дБ. Все функции управления выполняются с помощью интерфейса, отображаемого на сенсорном экране. Несколько таких генераторов также могут устанавливаться в одном блоке. Генераторы JV9XXX компании NoiseCom могут быть дополнительно оборудованы одним или несколькими вспомогательными входами, позволяющими подавать на линию питания внешние нестандартные сигналы.

ГШ серии J7XXXA от NoiseCom (см. рис. 12, а) выдают на выходе шумовые колебания (табл. 8). Эти приборы используются разработчиками серийных данных и инженерами по производственным испытаниям для выполнения требований к тестированию на дрожание [41].

Приборы серии UFX7XXXA от NoiseCom (см. табл. 8) вырабатывают широкополосный гауссовский шум в достаточно широких пределах изменения управляющих параметров [42]. Стандартные модели генерируют колебания в различной полосе частот и уровня выходной мощности.

ГШ модели 2007 от CROSS TECHNOLOGIES обеспечивают шумовой сигнал в диапазоне от 52 до 88 МГц с шагом 0.1 дБ [43]. Широкополосный шум поступает на прецизионные аттенюаторы, управляемые кнопочными переключателями "вверх" и "вниз" на передней панели через микропроцессорный контроллер. Экран на передней панели отображает соотношение сигнал/шум или ослабление шума от уровня. Полосовые фильтры выбираются с помощью встроенных переключателей для ограничения диапазона шума на частоте 70 МГц. Модели 2007 оснащены красным светодиодом на передней панели, который загора-

ется, если температура окружающей среды выходит за пределы диапазона температур от 15 до 40 °С. Желтый светодиод на передней панели указывает на удаленное управление.

Широкополосные ГШ модели TAS420 от Telecom Analysis Systems генерируют точные, запрограммированные пользователем уровни аддитивного белого гауссовского шума, что используется для разработки, характеристики и тестирования современного оборудования связи [44]. TAS420 генерируют шумовые колебания в диапазоне от 10 МГц до 1 ГГц с коэффициентом шума на выходе 15.5 дБ. Допустимое отклонение составляет ± 0.25 дБ.

ГШ фирмы dBm серии CNG – это полностью автоматизированные ГШ, которые устанавливают и поддерживают высокоточное соотношение между входным сигналом и генерируемым шумом (см. рис. 12, б). Прибор работает в широком диапазоне уровней мощности. Модульная конструкция обеспечивает 1 или 2 полностью независимых канала с частотой от 50 до 2700 МГц [45]. Модели CNG корректируют плотность шума и колебания уровня сигнала по частоте и интегрируют фактическую мощность шума в заданной пользователем полосе пропускания сигнала.

ГШ серии АКПП-3501 фирмы Shijiazhuang Suin Instruments Co., Ltd применяются в качестве генератора шумового сигнала с равномерным спектром и нормальным распределением мгновенных значений напряжения. Выходной шум имеет характеристику гауссовского белого шума за счет источника теплового шума и промежуточного усилителя. ГШ АКПП-3501 также предназначены для моделирования шума спутниковой связи, имитации гауссовского белого шума в области СВЧ-радиосвязи и моделирования РЭА. Серия работает в диапазоне от 15 до 1800 МГц с максимальным выходным уровнем 2 дБм [46].

ГШ в приборном исполнении с цифровым управлением серий PNG7XXXA, CNG-EbNo, JV9XXX, J7XXXA, UFX7XXXA, модель 2007, TAS420 и CNG при общем рассмотрении имеют множество отличительных параметров, но среди них можно выделить преимущества. Серия PNG7XXXA имеет малую погрешность при относительно небольшом диапазоне. У се-

рии J7XXXA широкий диапазон частот при относительно большой плотности шума и небольшой погрешности. Серия UFX7XXXA имеет большой диапазон частот, максимальную частоту работы 40 ГГц, большую плотность шума, но относительно высокую погрешность. Остальные серии генераторов обладают весьма узкими диапазонами частот и малым шагом перестройки частоты.

С аналоговым управлением. Устройства с аналоговым управлением имеют более быструю настройку параметров, в отличие от ГШ с цифровым управлением. Это происходит за счет того, что в ГШ с аналоговым управлением нет платы управления и изменение выходных параметров происходит за счет прямого изменения номиналов элементов схемы генератора. Зачастую это реализовано конденсатором переменной емкости. Изменение емкости конденсатора происходит при помощи вращающейся ручки на внешней панели изделия. Такие ГШ не имеют какого-либо программного обеспечения.

ГШ NoiseCom серии NC6XXX/8XXXA с аналоговым управлением (табл. 9) предназначены для общего применения широкополосного шума на стенде либо в составе стоечной испытательной станции (рис. 13, а). Аналоговое управление облегчает работу в условиях ограниченного испытательного времени [47].



Рис. 13. Генераторы шума в приборном исполнении с аналоговым управлением: а – серии NC6XXX/8XXXA фирмы NoiseCom; серии PE85N1018 фирмы Pasternack Enterprises; б – серии ANG фирмы Atlantic Microwave

Fig. 13. Instrumental noise generators with analog control: а – NC6XXX/8XXXA series from NoiseCom; PE85N1018 series from Pasternack Enterprises; б – Atlantic Microwave ANG series

Модель PE85N1018 – это калиброванный ГШ от Pasternack Enterprises, который работает в диапазоне частот от 10 МГц до 3 ГГц (рис. 13, а). Этот прибор генерирует уровень выходной мощности 0 дБм при отклонении ± 2.5 дБ [48]. Данный ГШ оснащен управляемым вручную поворотным аттенуатором на 10 дБ с шагом регулировки 1 дБ, что упрощает эксплуатацию. Прибор включает в себя прецизионный источник шума, усилитель, аттенуатор и источник питания и выдает симметричный сигнал белого гауссовского шума. ГШ может быть использован как на стенде, так и на стоечной испытательной станции. Идеально подходит для приложений, которые включают тестирование системной и компонентной беспроводной связи, имитацию сигнала, тестирование HDTV и CATV.

ГШ Atlantic Microwave серии ANG обеспечивают генерацию белого гауссовского шума мощностью до 1 Вт в нескольких моделях в диапазоне частот от 10 Гц до 18 ГГц (рис. 13, б) и применяются либо в качестве лабораторных приборов, либо в качестве встроенных системных тестовых установок [49].

ГШ в приборном исполнении с аналоговым управлением серий NC6XXX/8XXXA, PE85N1018 и ANG при общем рассмотрении имеют множество отличительных параметров, но в каждой серии можно выделить преимущества и недостатки. Серия NC6XXX/8XXXA имеет большой диапазон частот, большой выбор устройств, максимальную рабочую частоту 26.5 ГГц, но обладает относительно большой погрешностью. Серия PE85N1018 имеет небольшой диапазон частот с малым шагом перестройки частоты, но высокую погрешность. Серия ANG имеет большой диапазон частот с относительно низкой погрешностью.

Цифровые генераторы шума. Помимо ГШ с непрерывной генерацией шумового сигнала при помощи шумового диода или модульного ГШ существуют цифровые (дискретные)

Табл. 9. Технические параметры приборных ГШ с ручным управлением

Tab. 9. Technical parameters of instrumental NG with manual control

Производитель	Модель	Диапазон частот	Мощность, дБм	Допустимое отклонение, дБ
NoiseCom	NC6110A	100 Гц...1.5 ГГц	+10	± 2
NoiseCom	NC6128A	10 МГц...10 ГГц	-17	± 3.5
NoiseCom	NC6226A	2 ГГц...26.5 ГГц	-20	± 3
NoiseCom	NC8110A	2 МГц...500 МГц	+30	± 2.0
NoiseCom	NC8111A	5 МГц...1 ГГц	+30	± 2.5
NoiseCom	NC8112A	1 ГГц...2ГГц	+30	± 2.5



Рис. 14. Цифровые генераторы шума: а – серии RNG фирмы Atlantic Microwave; б – серии UFX7000B фирмы NoiseCom; в – серии DNG7500 фирмы NoiseCom; г – серии VXI7000 фирмы NoiseCom

Fig. 14. Digital noise generators: а – Atlantic Microwave RNG series; б – UFX7000B series by NoiseCom; в – DNG7500 series by NoiseCom; г – VXI7000 series by NoiseCom

решения. ГШ формируется за счет программной реализации математической модели шума. Такой шум не может в полной мере воспроизвести реальный случайный шум, так как реализация является дискретной или псевдослучайной. Но при помощи сложной математической модели можно реализовать более смешанный по структуре шум, состоящий из несколько видов шумов. Цифровые ГШ имеют лишь цифровое управление.

ГШ Atlantic Microwave серии RNG (рис. 14, а), управляемые через Ethernet, создают белый гауссовский шум мощностью до 1 Вт в нескольких моделях в диапазоне частот от 10 Гц до 18 ГГц и предназначены для использования либо в качестве лабораторных приборов, либо в качестве встроенных системных тестовых установок (табл. 10). Управление уровнем выходной мощности сигнала происходит с помощью удаленного графического интерфейса, т. е. при помощи локальной вычислительной машины с программным обеспечением, либо при помощи элементов управления на передней панели самого устройства [50].

Цифровой ГШ NoiseCom серии UFX7000B (рис. 14, б) оснащен мощным одноплатным

компьютером с гибкой архитектурой, используемым для создания сложных пользовательских шумовых сигналов для продвинутых тестовых систем (табл. 10) [51]. Прецизионные компоненты обеспечивают высокую выходную мощность, а гибкая компьютерная архитектура позволяет управлять несколькими аттенюаторами, переключателями и блоками фильтров.

ГШ NoiseCom DNG7500 синтезирует псевдослучайный шум и немодулированный сигнал для радиочастотных, сверхвысокочастотных и цифровых приложений (рис. 14, в). Данная модель генерирует шум в диапазоне от 500 кГц до 70 МГц [52]. Большой цветной дисплей с диагональю 8.4 дюйма содержит таблицы значений параметров сигналов, что способствует наглядности и повышает эффективность создания и хранения временных реализаций сигнала. Характеристики сигналов могут быть доведены до пределов необходимой полосы при помощи дополнительного гетеродина и частотного преобразователя. Созданные пользователем файлы данных формата MATLAB могут импортироваться для цифрового преобразования с последующим выводом в виде аналогового сигнала. Дополнительный двухканальный выход обес-

Табл. 10. Технические параметры цифрового ГШ

Tab. 10. Technical parameters of digital NG

Производитель	Модель	Диапазон частот	Выходная мощность, дБм	Допустимое отклонение, дБ
Atlantic Microwave	Серия RNG	10 Гц...1 ГГц	0...+30	±0.8...±3.0
NoiseCom	Серия UFX7000B	10 Гц...1 ГГц	-17...+30	±0.5...±4.0
NoiseCom	Серия VXI7000	10 Гц...40 ГГц	-20...+13	±0.5...±4.0

печивает возможность построения автоматизированных испытательных систем.

Приборы NoiseCom серии VXI7000 (рис. 14, *з*) содержат источник шума с усилением (табл. 10). Усилитель оптимизирован для получения выходного сигнала с гауссовским распределением амплитуды. Уровень выходной мощности шума можно регулировать от 0 до 127 дБ с шагом 1 дБ (и опционально 0.1 дБ). Уровень мощности выходного колебания контролируется радиочастотным переключателем [53].

Цифровой ГШ Boonton NGX1000 – это широкополосный генератор гауссовского белого шума. Работает в диапазоне частот от 10 МГц до 3 ГГц с равномерным распределением по всему диапазону частот, максимальная выходная мощность равна 10 дБм, а плотность шума варьируется от –77 до –95 дБм. Настройка параметров выходного шума происходит при помощи пользовательского интерфейса через сенсорный экран или ethernet-соединение. Данный ГШ применяется в аэрокосмических, спутниковых, медицинских и коммуникационных областях [54].

Цифровые ГШ серий RNG, UFX7000B, DNG7500 и VXI7000 при общем рассмотрении имеют множество схожих параметров, но в каждой серии можно выделить преимущества и недо-

статки. Серия RNG имеет большой выбор устройств и относительно малую погрешность. Серия UFX7000B обладает широким диапазоном частот, большой плотностью шума, но имеет относительно высокую погрешность. Серия DNG7500 обладает более узким диапазоном с малым шагом перестройки частоты. Серия VXI7000 имеет широкий диапазон частот, но относительно высокую погрешность.

Генераторы шума для обеспечения информационной безопасности. ГШ активно применяют в информационной безопасности для различных задач.

Физическую основу сигналов, возникающих во время работы в выделенном помещении радиосредств, составляют побочные электромагнитные излучения и наводки (ПЭМИН). Процессы и явления, образующие ПЭМИН, по способам возникновения можно разделить на 5 видов:

- не предусмотренные функциями радиосредств и электрических приборов;
- преобразования внешних акустических сигналов в электрические сигналы;
- паразитные связи и наводки;
- побочные низкочастотные излучения;
- побочные высокочастотные излучения.

ГШ "Покров" (рис. 15, *а*), разработанный

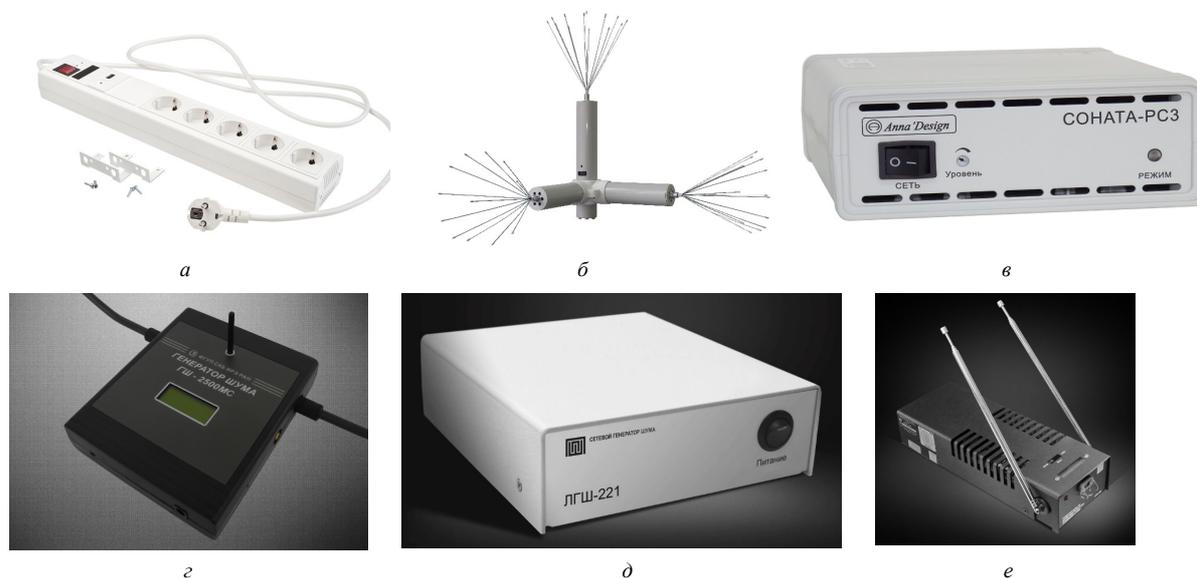


Рис. 15. Генераторы шума для информационной безопасности: *а* – "Покров" фирмы ООО "Радиоэлектронные системы"; *б* – "Соната-Р3" фирмы ООО "Анна"; *в* – "Соната-РС3" фирмы ООО "Анна"; *г* – ГШ-2500МС, разработанный ФГУП СКБ ИРЭ РАН; *д* – ЛГШ-221 фирмы АО "Лаборатория противодействия промышленному шпионажу"; *е* – ЛГШ-503 фирмы АО "Лаборатория противодействия промышленному шпионажу"

Fig. 15. Noise generators for information security: *a* – "Pokrov" company LLC "Radioelectronic systems"; *б* – "Sonata-R3" company LLC "Anna"; *в* – "Sonata-RS3" of the company "Anna"; *г* – GSh-2500MS developed by the Federal State Unitary Enterprise SKB IRE RAS; *д* – LGS-221 of the JSC "Laboratory for combating industrial espionage"; *е* – LGS-503 of the Laboratory for Combating Industrial Espionage, JSC

ООО "Радиоэлектронные системы", предназначен для защиты информации от утечки по техническим каналам за счет ПЭМИН посредством излучения в окружающее пространство электромагнитного поля шумового сигнала и наводок на линии электропитания и заземления. ГШ имеет централизованное управление и контроль по Ethernet для применения в системах пространственного зашумления, а также независимую регулировку уровней электромагнитного поля шумового сигнала и шумового сигнала в линии электропитания и заземления. Выполнен в виде сетевого удлинителя с пятью розетками типа F [55].

ГШ "Соната-РЗ", производимый компанией ООО "Анна" (рис. 15, б), является средством активной защиты (САЗ) информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений и наводок [56]. "Соната-РЗ" конструктивно может быть выполнен как система из трех САЗ "Соната-РЗ.1", установленных вдоль трех взаимно-перпендикулярных осей, либо в виде единого блока.

"Соната-РСЗ", разработанный компанией ООО "Анна" (рис. 15, в), является устройством для защиты линий электропитания, заземления от утечки информации. Он предназначен для защиты объектов вычислительной техники от утечки информации за счет наводок на линии электропитания и заземления [57].

ГШ ГШ-2500МС, созданный ФГУП СКБ ИРЭ РАН (рис. 15, з), является техническим средством активной защиты и предназначен для маскировки информативных побочных электромагнитных излучений и наводок персональных компьютеров, рабочих станций посредством формирования и излучения в окружающее пространство электромагнитного поля шума и наведения маскирующего сигнала в отходящие цепи и инженерные коммуникации в широком диапазоне частот [58].

ГШ ЛГШ-221 (рис. 15, д), разработанный АО "Лаборатория противодействия промышленному шпионажу" и изготавливаемый компанией ООО "Ленспецпроизводство", предназначен для использования в целях защиты информации, содержащей сведения, составляющие государственную тайну, и иной информации с ограниченным доступом, обрабатываемой тех-

ническими средствами и системами, от утечки за счет наводок посредством формирования маскирующих шумоподобных помех [59].

ГШ ЛГШ-503 (рис. 15, е), созданный АО "Лаборатория противодействия промышленному шпионажу" и производимый компанией ООО "Ленспецпроизводство", является средством активной защиты информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений, а также средством активной защиты информации от наводок информативного сигнала на проводники, в том числе на цепи заземления и электропитания, токопроводящие линии и инженерно-технические коммуникации, выходящие за пределы контролируемой зоны [60].

Измерители коэффициента шума. Для измерения шумовых параметров радиоэлектронных устройств промышленность выпускает измерители коэффициента шума (ИКШ). Все они построены по модуляционному методу с компенсацией собственных шумов. Благодаря преобразованию частоты ИКШ работает в широком диапазоне частот. ИКШ выпускаются как в модульном, так и в приборном исполнениях.

ИКШ NoiseCom серии NC346 (рис. 16) предназначены для прецизионного измерения уровня шума [61]. Конструктивно ИКШ серии NC346 представляет собой сборку, состоящую из схемы стабилизации тока, обеспечивающей режим работы ЛПД, генераторной секции, которая включает в себя ЛПД и согласующую цепь, аттенюатора для обеспечения необходимого уровня и равномерности спектра шумового сигнала, а также малого и практически неизменного коэффициента отражения выхода генератора во включенном и выключенном состояниях, заключенную в общий корпус.

NC346 имеют широкополосный охват и чрезвычайно хорошую стабильность темпера-



Рис. 16. Модульный ИКШ серии NC346 фирмы NoiseCom
Fig. 16. Modular noise figure meter NC346 series from NoiseCom

Табл. 11. Технические параметры модульных ИКШ

Tab. 11. Technical parameters of modular noise figure meters

Производитель	Модель	Диапазон частот, ГГц	Коэффициент шума на выходе, дБ
"Микран"	ГШМ2-18В-11	0.01...18	13...16
"Микран"	ГШМ2-20В-13	0.01...20	13...16

туры и напряжения, что соответствует самым высоким лабораторным стандартам, совместимым с измерителями уровня шума. Доступны выходы 6, 15.5 и 22 дБ, что позволяет приборам точно измерять показатели шума до 20, 30 и 36 дБ соответственно. Диапазон рабочих частот от 10 МГц до 40 ГГц.

ИКШ отечественной компании "Микран" серии ГШМ (табл. 11) предназначены для использования в качестве измерителя перепада спектральной плотности шумовой мощности в диапазоне частот от 0.01 до 20 ГГц (рис. 17, б). Источником шумового напряжения в ИКШ является ЛПД, установленный в модуль гибридной интегральной схемы. Питание ЛПД осуществляется через встроенный стабилизатор тока, обеспечивающий стабильность уровня СПМШ независимо от стабильности напряжения питания ГШ [62].

Модульные ИКШ Maury Microwave серии MT76XX (рис. 17, а) обеспечивают калиброванные уровни шума, необходимые для оценки шумовых характеристик приемников, усилителей и других линейных преобразователей [63]. ИКШ данной серии имеют диапазон частот от 0.01 до 26.5 ГГц с коэффициентом шума на выходе 15 дБ. Быстрое включение-выключение,

наряду со стабильным воспроизводимым уровнем шума и низкими требованиями к энергопотреблению, делают серию MT76XX идеальным дополнением к измерителям уровня шума прямого считывания.

ИКШ серии X5M от "Микран" (рис. 17, в) предназначены для измерения коэффициента шума и коэффициента передачи приемно-усилительных устройств (табл. 12). Работа измерителя коэффициента шума серии X5M основана на сравнении шумов исследуемого объекта с шумами известной интенсивности, создаваемыми измерительным ГШ. Процессу измерения предшествует калибровка — процедура определения характеристик приемного тракта ИКШ, необходимая для точного расчета коэффициента усиления и коэффициента шума измеряемого устройства [64]. Управление X5M осуществляется с помощью персонального компьютера с установленным ПО "Graphit X5M", по интерфейсу Ethernet. Многоканальная система синхронизации обеспечивает совместную работу ИКШ с другими приборами. Возможность управления через команды SCPI позволяет интегрировать прибор в автоматизированные контрольно-измерительные комплек-

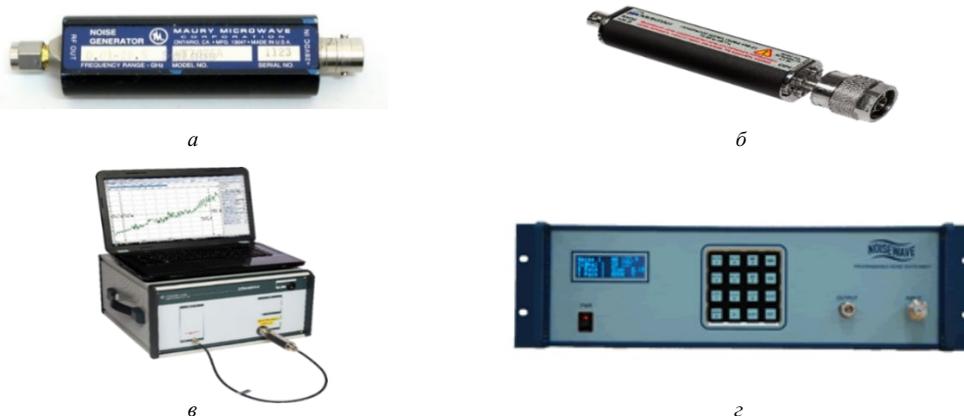


Рис. 17. Измерители коэффициента шума: а – модульный серии MT76XX фирмы Maury Microwave; б – модульный серии ГШМ фирмы "Микран"; в – аппаратный серии X5M фирмы "Микран"; г – аппаратный серии NW-ATE фирмы NoiseWave

Fig. 17. Noise figure meters: а – modular MT76XX series from Maury Microwave; б – modular GShM series from "Mikran"; в – hardware series X5M from "Mikran"; г – hardware series NW-ATE from NoiseWave

Табл. 12. Технические параметры приборного ИКШ "Микран" серии X5M

Tab. 12. Technical parameters of the instrument noise figure meter Mikran X5M series

Технические характеристики	Модели	
	X5M-04	X5M-18
Диапазон рабочих частот	10 МГц...4 ГГц	50 МГц...20 ГГц
Диапазон измерения коэффициента передачи, дБ	-20...30	-20...30
Собственный коэффициент шума, дБ	6	5
Пределы допустимой абсолютной систематической погрешности измерений коэффициента шума, дБ	±0.1	±0.1

Табл. 13. Технические параметры приборных ИКШ

Tab. 13. Technical parameters of instrument noise figure meters

Производитель	Модель	Диапазон частот	Мощность, дБм	Допустимое отклонение, дБ
NoiseWave	NW100M	100 кГц...100 МГц	+13	±1.0
NoiseWave	NW300M	100 кГц...300 МГц	+10	±1.0
NoiseWave	NW500M	100 кГц...500 МГц	+10	±1.5
NoiseWave	NW1G	100 кГц...1 ГГц	+10	±2.0
NoiseWave	NW2G	10 МГц...2 ГГц	0	±2.0
NoiseWave	NW3G	10 МГц...3 ГГц	0	±2.0
NoiseWave	NW4G	10 МГц...4 ГГц	-10	±2.5
NoiseWave	NW6G	10 МГц...6 ГГц	-10	±2.5
NoiseWave	NW18G	2...18 ГГц	-14	±2.5

сы. В зависимости от состава используемых в приборе аппаратных опций анализаторы коэффициента шума разделяются на модификации.

ИКШ Keysight Technologies серии U1831C применяются для широкополосных измерений коэффициента шума. Работают на частотах от 10 МГц до 26.5 ГГц. Показатели ENR варьируются от 12 до 17 дБ, а погрешность составляет в среднем ±0.15 дБ. Можно подключить по USB к ПК [65].

ГШ NoiseWave серии NW-MI – это ИКШ ручного управления (табл. 13), подходящий для многих применений. Области применения этого прибора включают тестирование систем и компонентов беспроводной связи, имитацию сигнала, тестирование телевидения высокой четкости и кабельного телевидения, а также использование в качестве тестового источника общего назначения и экономичного источника для тестирования частоты битовых ошибок [66].

ИКШ NoiseWave серии NW-ATE (рис. 17, з) применяют для тестирования беспроводной связи системы и компонентов, имитации сигнала, тестирования 10-гигабитных сетей Ethernet, HDTV и SATV, а также используют в качестве тестового источника общего назначения (табл. 13) и экономичного источника для тестирования частоты ошибок в битах [67].

Измерители коэффициента шума серий NC346, ГШМ, МТ76ХХ, X5M, NW-MI и NW-

ATE при общем рассмотрении имеют множество отличительных параметров, но в каждой серии можно выделить преимущества и недостатки. Серия NC346 имеет широкий диапазон частот, большой выбор устройств, максимальную рабочую частоту 55 ГГц, но обладает относительно высокой погрешностью. Серия ГШМ имеет небольшой диапазон частот с малым шагом перестройки частоты, но относительно высокую погрешность. Серия МТ76ХХ имеет широкий диапазон частот с небольшим шагом перестройки частоты и с относительно малой погрешностью. Серия X5M имеет небольшой диапазон частот с малым шагом перестройки частоты и малую погрешность, но большие габариты и массу. Серия NW-MI имеет узкий диапазон частот с малым шагом перестройки частоты и с относительно небольшой погрешностью. Серия NW-ATE обладает большим диапазоном частот, но относительно высокой погрешностью.

Заключение. В настоящее время существует большое разнообразие в реализации генераторов шумовых сигналов. Несмотря на большой спектр применений генераторов шумовых сигналов, обзорных публикаций, описывающих их характеристики, крайне мало. На сегодняшний день ГШ для исследовательских целей производит множество компаний, в основ-

ном зарубежных. Наибольшее количество решений представлено компаниями NoiseCom и NoiseWave. Другие иностранные компании, например Maury Microwave, dBm и др., имеют более скромный список выпускаемой продукции. На отечественном рынке компании АО «НПФ "МИКРАН"» и ООО "СКАРД" представляют существенно меньший выбор ГШ по сравнению с зарубежными компаниями. При этом во многих

отечественных компаниях ведутся разработки аналогов зарубежных генераторов шумовых сигналов, а также новых моделей ГШ и измерителей коэффициента шума. В сфере информационной безопасности на рынке отечественных производителей представлен большой выбор компаний, таких, как ООО "Радиоэлектронные системы", ООО "Анна" и т. д.

Авторский вклад

Винокуров Сергей Андреевич – подготовка текста статьи и рисунков.

Кочемасов Виктор Неофидович – подготовка текста статьи.

Сафин Ансар Ризаевич – подготовка текста статьи.

Author's contribution

Sergey A. Vinokurov, preparation of the text and figures for the paper.

Victor N. Kochemasov, preparation of the text for the paper.

Ansar R. Safin, preparation of the text for the paper.

Список литературы

1. Тетерич Н. М. Генераторы шума. М.: Госэнергоиздат, 1961. 128 с.
2. Бендат Дж. Основы теории случайных шумов и ее применения. М.: Наука, 1965. 464 с.
3. Мун Ф. Хаотические колебания: вводный курс для научных работников и инженеров. М.: Мир, 1990. 312 с.
4. Черепанов В. П., Коневских В. М., Львов В. Н. Газоразрядные источники шумов. М.: Сов. радио, 1968. 54 с.
5. Фабер О. Генераторы шума на стабилитронах. М.: Радио, 1969. 101 с.
6. ФЭУ-22. URL: <https://zapadpribor.com/feu-22/> (дата обращения 26.09.2022)
7. Урбанович П. В. Генератор шума с подстройкой диапазонов // Докл. ТУСУРа. 2008. № 2 (18). Ч. 1. С. 9–11.
8. Мясин Е. А., Котов В. Д. Широкополосные диодные генераторы шума миллиметрового диапазона волн // Радиотехника. 2005. № 3. С. 46–50.
9. Design and implementation of an X-band white Gaussian noise generator / R. A. Gholam, M. Norooz, K. Masoud, M. S. Hamid Mir // Proc. of 2008 Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering. Niagara Falls, ON, Canada, 04–07 May 2008. P. 4.
10. Перов Б. Г. Анализ математических моделей каналов связи с белым гауссовым шумом // Молодой ученый. 2013. № 6 (53). С. 114–116.
11. Аудиовыход как скрытый канал утечки данных: технологии создания и методы защиты / М. М. Фучко, А. В. Широких, А. А. Захаров, Е. С. Несговоров, Е. А. Оленников // Вестн. УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2016. № 3 (21). С. 4–9.
12. NC100/200/300/400 datasheet. URL: <https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/nc100200300400web.pdf> (дата обращения 14.09.2023)
13. NW100/200/300/400 datasheet. URL: <https://noisewave.com/diodes> (дата обращения 15.11.2022)
14. NC500/500SM datasheet. URL: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC500REV3_datasheet_WEB.pdf (дата обращения 15.11.2022)
15. NC2000/4000 datasheet. URL: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC2_4000_Datasheet_WEB.pdf (дата обращения 15.11.2022)
16. NW-D datasheet. URL: <https://noisewave.com/nw-d.html> (дата обращения 15.11.2022)
17. NC3400 datasheet. URL: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC3400_Datasheet_719.pdf (дата обращения 17.11.2022)
18. NX1500 datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/atm-inc/608-249-nx1501r/> (дата обращения 19.11.2022)
19. CI600/700/800/900 datasheet. URL: <https://www.chipfind.ru/datasheet/mwireless/ci600n.htm> (дата обращения 23.11.2022)
20. 1660X datasheet. URL: <https://arrivatek.com/wp-content/uploads/2022/08/Specifikaciya-Seriya-1660H.pdf> (дата обращения 14.09.2023)
21. NW-CS datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/noisewave/608-177-nw2g-15-cs/> (дата обращения 25.11.2022)
22. R&S@FS-SNS datasheet. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/product_brochure/5216_2718_11/FS-SNS_bro_de_5216_2718_11_v0400.pdf (дата обращения 09.06.2023)

23. 346X datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/agilent-technologies/608-23-364c> (дата обращения 09.06.2023)
24. STZ-08-01 datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/sage-millimeter-inc/608-278-stz-08-01> (дата обращения 09.06.2023)
25. NMA-2400 datasheet. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/296895/MICRONETICS/NMA-2410.html> (дата обращения 25.11.2022)
26. NC5000A datasheet. URL: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC5000A_Datasheet.pdf (дата обращения 17.11.2022)
27. B3NG16 datasheet. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694679056&tld=ru&lang=en&name=E2v.pdf&text=series%20B3NG16%20from%20Teledyne%20e2v&url=http%3A%2F%2Fwww.advante.ru%2Fcomponents%2FE2v.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&sign=28e25e8e436a93a9dde8d6875f3ac1e0&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694679056%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DE2v.pdf%26text%3Dseries%2BB3NG16%2Bfrom%2BTeledyne%2Be2v%26url%3Dhttp%253A%2F%2Fwww.advante.ru%2Fcomponents%2FE2v.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26110n%3Dru%26sign%3D28e25e8e436a93a9dde8d6875f3ac1e0%26keyno%3D0%26nosw%3D1> (дата обращения 14.09.2023)
28. MH datasheet. URL: <http://skard.ru/product/seriya-mh/> (дата обращения 23.11.2022)
29. WG-NS datasheet. URL: <http://farran.ru/pdf/Farran%20Catalogue%208th%20Edition%202009.pdf> (дата обращения 25.11.2022)
30. Q347B datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/agilent-technologies/608-23-q347b> (дата обращения 10.06.2023)
31. STZ-19-I1 datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/sage-millimeter-inc/608-278-stz-19-i1> (дата обращения 10.06.2023)
32. STZ-22-I1 datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/sage-millimeter-inc/608-278-stz-22-i1> (дата обращения 10.06.2023)
33. NC1000 datasheet. URL: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC1000_Datasheet.pdf (дата обращения 17.11.2022)
34. PNS-XX datasheet. URL: <https://elva-1.com/products/a40037/> (дата обращения 23.11.2022)
35. NC3000 datasheet. URL: <https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/nc3000-coaxial-noise-sources-datasheet.pdf> (дата обращения 17.11.2022)
36. ISSN-XX datasheet. URL: <https://elva-1.com/products/a40036/> (дата обращения 23.11.2022)
37. NW-CS-I datasheet. URL: https://noisewave.com/spec_sheets/NW-cs-i_revA.pdf (дата обращения 25.11.2022)
38. PNG7000A datasheet. URL: https://testequipment.center/Product_Documents/Noise-com-PNG7107-Specifications-45DCC.pdf (дата обращения 26.11.2022)
39. CNG-EbNo datasheet. URL: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/cng-ebno_datasheet.pdf?ver=2022-03-29-172303-327 (дата обращения 26.11.2022)
40. JV9000 datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-generators/NoiseCom/864-300-jv9000-series/> (дата обращения 26.11.2022)
41. J7000A datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-generators/noisecom/864-300-j7000a-series> (дата обращения 14.09.2023)
42. UFX7000A datasheet. URL: <https://noisecom.com/products/instruments/ufx7000a-awgn-noise-generator> (дата обращения 26.11.2022)
43. MODEL 2007 Noise Source datasheet. URL: <https://www.crosstechnologies.com/manuals/2007%20MANUAL.pdf> (дата обращения 26.11.2022)
44. TAS 420 datasheet. URL: <https://www.microwavejournal.com/articles/2488-test-equipment/> (дата обращения 27.11.2022)
45. CNG datasheet. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694679621&tld=ru&lang=en&name=CNG11.pdf&text=Noise%20Generator%20-%20CNG%20Series&url=https%3A%2F%2Fwww.dmgcommunication.it%2Fwp-content%2Fuploads%2F2016%2F02%2FCNG11.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&sign=167025bb8864c68fe414150223fd995d&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694679621%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DCNG11.pdf%26text%3DNoise%2BGenerator%2B%25E2%2580%2593%2BCNG%2BSeries%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.dmgcommunication.it%2Fwp-content%2Fuploads%2F2016%2F02%2FCNG11.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26110n%3Dru%26sign%3D167025bb8864c68fe414150223fd995d%26keyno%3D0%26nosw%3D1> (дата обращения 14.09.2023)
46. АКПП-3501. URL: https://prist.ru/upload/iblock/c6f/t1tmc08mye0zzthwi3hek73phokut1b1/SU4300_4301_4302-_AKIP_3501_1_2_3-_katalog.pdf (дата обращения 11.06.2023)
47. NC6000/8000A datasheet. URL: <https://noisecom.com/products/instruments/nc6000a-8000a-series-awgn-noise-generator/product-information> (дата обращения 26.11.2022)
48. PE85N1018 datasheet. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/806842/PASTERNAK/PE85N1018.html> (дата обращения 26.11.2022)
49. ANG datasheet. URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694680105&tld=ru&lang=en&name=ANG%20Series%20V1.0_2.pdf&text=Atlantic%20Microwave%20ANG%20datasheet&url=https%3A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FANG%2520Series%2520V1.0_2.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&si

gn=6d9ec723eef1db34b553981b2b772202&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694680105%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DANG%2520Series%2520V1.0_2.pdf%26text%3DAtlantic%2BMicrowave%2BANG%2Bdatasheet%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FRNG%2520Series%2520V1.0_2.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26110n%3Dru%26sign%3D6d9ec723eef1db34b553981b2b772202%26keyno%3D0%26nosw%3D1 (дата обращения 14.09.2023)

50. RNG datasheet. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694680241&tld=ru&lang=en&name=RNG%20Series%20V1.0.pdf&text=Atlantic%20Microwave%20RNG%20datasheet&url=https%3A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FRNG%2520Series%2520V1.0.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&sign=c8acc7769279a06d476b348788bb11&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694680241%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DRNG%2520Series%2520V1.0.pdf%26text%3DAtlantic%2BMicrowave%2BRNG%2Bdatasheet%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FRNG%2520Series%2520V1.0.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26110n%3Dru%26sign%3Dca8acc7769279a06d476b348788bb11%26keyno%3D0%26nosw%3D1> (дата обращения 14.09.2023)

51. UFX7000B datasheet. URL: <https://noisecom.com/products/instruments/ufx7000b-programmable-noise-generator> (дата обращения 27.11.2022)

52. DNG7500 datasheet. URL: https://www.4test.ru/catalog/radioizmeritelnoe_oborudovanie/istochniki_shuma_1/istochniki_shuma_dng7500/ (дата обращения 27.11.2022)

53. VXI7000 datasheet. URL: <https://www.rfglobalnet.com/doc/NoiseCom-vxi7000-series-vxibus-programmable-n-0002/> (дата обращения 27.11.2022)

54. NGX1000 datasheet. URL: <https://boonton.com/Portals/0/datasheets/boonton-ngx1000-programmable-noise-generator-datasheet.pdf> (дата обращения 11.06.2023)

55. Генератор шума Покров. URL: <https://irsural.ru/poleznaaya-informaciya/generator-shuma-pokrov/> (дата обращения 25.02.23)

56. Соната-Р3. URL: <https://irsural.ru/szi/pemin/saz/sonata-r31-product-9.html> (дата обращения 25.02.23)

57. Соната-РС3. URL: <https://irsural.ru/szi/pemin/saz/sonata-rs3-sredstvo-aktivnoi-zashity-informacii-ot-utechki-po-seti-elektropitaniya-i-liniyam-zazemleniya-1-klass-product-20.html> (дата обращения 25.02.23)

58. Генератор шума ГШ-2500МС. URL: <https://irsural.ru/szi/pemin/saz/gsh-2500ms-generator-shuma-isp-tidn464217010-product-377.html> (дата обращения 25.02.23)

59. Генератор шума ЛГШ-221. URL: <http://www.pps.ru/?part=catalog&product=243/> (дата обращения 25.02.23)

60. Генератор шума ЛГШ-503. URL: <http://www.pps.ru/?part=catalog&product=93/> (дата обращения 25.02.23)

61. NC346 datasheet. URL: <https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/nc346-datasheet.pdf> (дата обращения 14.09.2023)

62. ГШМ datasheet. URL: <https://www.micran.ru/productions/IIS/kia/gshm/gshm/> (дата обращения 23.11.2022)

63. МТ7600 datasheet. URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694680428&tld=ru&name=Maurym_T76xx.pdf&text=Maurym%20Microwave%20MT7600&url=http%3A%2F%2Fwww.sglabs.it%2Fpublic%2FMaurym_MT76xx.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&sign=bf9ff9a63dd3a7d605739fa7911d70ac&keyno=0&serpParams=tm%3D1694680428%26tld%3Dru%26name%3DMaurym_MT76xx.pdf%26text%3D%25D0%259Caurym%2BMicrowave%2BMT7600%26url%3Dhttp%253A%2F%2Fwww.sglabs.it%2Fpublic%2FMaurym_MT76xx.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26110n%3Dru%26sign%3Dbf9ff9a63dd3a7d605739fa7911d70ac%26keyno%3D0 (дата обращения 14.09.2023)

64. X5M datasheet. URL: <https://www.micran.ru/productions/IIS/kia/nfa/x5m/> (дата обращения 27.11.2022)

65. U1831C datasheet. URL: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/agilent-technologies/608-23-u1831c> (дата обращения 12.06.2023)

66. NW-MI datasheet. URL: <https://noisewave.com/nw-mi.html> (дата обращения 27.11.2022)

67. NW-ATE datasheet. URL: <https://noisewave.com/nw-ate.html/> (дата обращения 27.11.2022)

Информация об авторах

Винокуров Сергей Андреевич – аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета (НИУ) "МЭИ", инженер-разработчик ООО "Радиокомп", инженер ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника; устройства формирования и обработки радиосигналов.

Адрес: НИУ "МЭИ", ул. Красноказарменная, д. 14, Москва, 111250, Россия

E-mail: sergey.vinokurov@yandex.ru

Кочемасов Виктор Неофидович – кандидат технических наук (1976), генеральный директор ООО "Радиокомп". Автор более 150 научных работ, включая 4 монографии и более 40 авторских свидетельств на изобретения. Сфера научных интересов – радиотехника; устройства формирования и обработки радиосигналов,

фильтры СВЧ; синтезаторы частот и сигналов.

Адрес: ООО "Радиокомп", пр. Волгоградский, д. 42, Москва, 109316, Россия

E-mail: kochemasovdv@gmail.com

Сафин Ансар Ризаевич – кандидат технических наук (2014), доцент, заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов НИУ "МЭИ", старший научный сотрудник ИПЭ им. В. А. Котельникова РАН, начальник отдела в ООО "Радиокомп". Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника; физика магнитных явлений; спинтроника.

Адрес: НИУ "МЭИ", ул. Красноказарменная, д. 14, Москва, 111250, Россия

E-mail: arsafin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

References

1. Teterich N. M. *Generatory shuma* [Noise generators]. Moscow, Gosenergoizdat, 1961, 128 p. (In Russ.)
2. Bendat J. *Osnovy teorii sluchainykh shumov i ee primeniya* [Fundamentals of the Theory of Random Noise and Its Application]. Moscow, Nauka, 1965, 464 p. (In Russ.)
3. Moon F. *Khaoticheskie kolebaniya: vvodnyi kurs dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Chaotic Fluctuations: an Introductory Course for Scientists and Engineers]. Moscow, Mir, 1990, 312 p. (In Russ.)
4. Cherepanov V. P., Konevskikh V. M., Lvov V. N. *Gazorazryadnye istochniki shumov* [Gas-Discharge Noise Sources]. Moscow, Soviet Radio, 1968, 54 p. (In Russ.)
5. Faber O. *Generatory shuma na stabilitonakh* [Noise Generators on Zener Diodes]. Moscow, Radio, 1969, 101 p. (In Russ.)
6. FEU-22. Available at: <https://zapadpribor.com/feu-22/> (accessed 26.09.2022).
7. Urbanovich P. V. Noise Generator with Range Adjustment. Reports of TUSUR. 2008, no. 2 (18), pt. 1, pp. 9–11. (In Russ.)
8. Myasin E. A., Kotov V. D. Broadband Diode Noise Generators of the Millimeter Wave Range. Radio Engineering. 2005, no. 3, pp. 46–50. (In Russ.)
9. Gholam R. A., Norooz M., Masoud K., Hamid Mir M. S. Design and Implementation of an X-band white Gaussian Noise Generator. Proc. of 2008 Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering. Niagara Falls, ON, Canada, 04–07 May 2008, p. 4.
10. Perov B. G. Analysis of Mathematical Models of Communication Channels with White Gaussian noise. Young Scientist. 2013, no. 6 (53), pp. 114–116. (In Russ.)
11. Fuchko M. M., Shirokikh A. V., Zakharov A. A., Nesgovorov E. S., Olennikov E. A. Audio Output as a Hidden Data Leakage Channel: Creation Technologies and Protection Methods. Vestn. UrFO. Security in the Information Sphere. 2016, no. 3 (21), pp. 4–9. (In Russ.)
12. NC100/200/300/400 datasheet. Available at: <https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/nc100200300400web.pdf> (accessed 14.09.2023)
13. NW100/200/300/400 datasheet. Available at: <https://noisewave.com/diodes> (accessed 15.11.2022)
14. NC500/500SM datasheet. Available at: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC500REV3_datasheet_WEB.pdf (accessed 15.11.2022)
15. NC2000/4000 datasheet. Available at: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC2_4000_Datasheet_WEB.pdf (accessed 15.11.2022)
16. NW-D datasheet. Available at: <https://noisewave.com/nw-d.html> (accessed 15.11.2022)
17. NC3400 datasheet. Available at: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC3400_Datasheet_719.pdf (accessed 17.11.2022)
18. NX1500 datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/atm-inc/608-249-nx1501r/> (accessed 19.11.2022)
19. CI600/700/800/900 datasheet. Available at: <https://www.chipfind.ru/datasheet/mwireless/ci600n.htm/> (accessed 23.11.2022)
20. 1660X datasheet. Available at: <https://arrivatek.com/wp-content/uploads/2022/08/Specifikaciya-Seriya-1660H.pdf> (accessed 14.09.2023)
21. NW-CS datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/noisewave/608-177-nw2g-15-cs/> (accessed 25.11.2022)
22. R&S@FS-SNS datasheet. Available at: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/product_brochure/5216_2718_11/FS-SNS_bro_de_5216_2718_11_v0400.pdf (accessed 09.06.2023)
23. 346X datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/agilent-technologies/608-23-364c> (accessed 09.06.2023)
24. STZ-08-01 datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/sage-millimeter-inc/608-278-stz-08-01> (accessed 09.06.2023)
25. NMA-2400 datasheet. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/296895/MICRONETICS/NMA-2410.html/> (accessed 25.11.2022)
26. NC5000A datasheet. Available at: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC5000A_Datasheet.pdf (accessed 17.11.2022)
27. B3NG16 datasheet. Available at: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694679056&tld=ru&lang=en&name=E2v.pdf&text=series%20B3NG16%20from%20Teledyne%20e2v&url=http%3A%2F%2Fwww.advante.ru%2Fcomponents%2FE2v.pdf&lr=213&mime=pdf&110n=ru&sign=28e25e8e436a93a9dde8d6875f3ac1e0&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694679056%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DE2v.pdf%26text%3Dseries%2BB3NG16%2Bfrom%2BTeledyne%2Be2v%26url%3Dhttp%253A%2F%2Fwww.adv>

ante.ru%2Fcomponents%2FE2v.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3D28e25e8e436a93a9dde8d6875f3ac1e0%26keyno%3D0%26nosw%3D1 (accessed 14.09.2023)

28. MH datasheet. Available at: <http://skard.ru/product/seriya-mm/> (accessed 23.11.2022)

29. WG-NS datasheet. Available at: <http://farran.ru/pdf/Farran%20Catalogue%20th%20Edition%202009.pdf> (accessed 25.11.2022)

30. Q347B datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/agilent-technologies/608-23-q347b> (accessed 10.06.2023)

31. STZ-19-I1 datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/sage-millimeter-inc/608-278-stz-19-i1> (accessed 10.06.2023)

32. STZ-22-I1 datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/sage-millimeter-inc/608-278-stz-22-i1> (accessed 10.06.2023)

33. NC1000 datasheet. Available at: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/NC1000_Datasheet.pdf (accessed 17.11.2022)

34. PNS-XX datasheet. Available at: <https://elva-1.com/products/a40037/> (accessed 23.11.2022)

35. NC3000 datasheet. Available at: <https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/nc3000-coaxial-noise-sources-datasheet.pdf> (accessed 17.11.2022)

36. ISSN-XX datasheet. Available at: <https://elva-1.com/products/a40036/> (accessed 23.11.2022)

37. NW-CS-I datasheet. Available at: https://noisewave.com/spec_sheets/NW-cs-i_revA.pdf (accessed 25.11.2022).

38. PNG7000A datasheet. Available at: https://testequipment.center/Product_Documents/Noisecom-PNG7107-Specifications-45DCC.pdf (accessed 26.11.2022)

39. CNG-EbNo datasheet. Available at: https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/cng-ebno_datasheet.pdf?ver=2022-03-29-172303-327 (accessed 26.11.2022)

40. JV9000 datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-generators/NoiseCom/864-300-jv9000-series/> (accessed 26.11.2022)

41. J7000A datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-generators/noisecom/864-300-j7000a-series> (accessed 14.09.2023)

42. UFX7000A datasheet. Available at: <https://noisecom.com/products/instruments/ufx7000a-awgn-noise-generator> (accessed 26.11.2022)

43. MODEL 2007 Noise Source datasheet. Available at: <https://www.crosstechnologies.com/manuals/2007%20MANUAL.pdf> (accessed 26.11.2022)

44. TAS 420 datasheet. Available at: <https://www.microwavejournal.com/articles/2488-test-equipment/> (accessed 27.11.2022)

45. CNG datasheet. Available at: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694679621&tld=ru&lang=en&name=CNG11.pdf&text=Noise%20Generator%20-%20CNG%20Series&url=https%3A%2F%2Fwww.dmgcommunication.it%2Fwp-con-tent%2Fuploads%2>

F2016%2F02%2FCNG11.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=167025bb8864c68fe414150223fd995d&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694679621%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DCNG11.pdf%26ext%3DNoise%2BGenerator%2B%25E2%2580%2593%2BCNG%2BSeries%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.dmgcommunication.it%2Fwp-con-tent%2Fuploads%2F2016%2F02%2FCNG11.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3D167025bb8864c68fe414150223fd995d%26keyno%3D0%26nosw%3D1 (accessed 14.09.2023)

46. АКПП-3501. Available at: https://prist.ru/upload/iblock/c6f/t1tmc08mye0zzthwi3hek73phokut1b1/SU4300_4301_4302-_AKIP_3501_1_2_3-_katalog.pdf (accessed 11.06.2023)

47. NC6000/8000A datasheet. Available at: <https://noisecom.com/products/instruments/nc6000a-8000a-series-awgn-noise-generator/product-information> (accessed 26.11.2022)

48. PE85N1018 datasheet. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/806842/PASTERNAK/PE85N1018.html/> (accessed 26.11.2022)

49. ANG datasheet. Available at: [50. RNG datasheet. Available at: \[51. UFX7000B datasheet. Available at: <https://noisecom.com/products/instruments/ufx7000b->\]\(https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694680241&tld=ru&lang=en&name=RNG%20Series%20V1.0.pdf&text=Atlantic%20Microwave%20RNG%20datasheet&url=https%3A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FRNG%2520Series%2520V1.0.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=ca8cacc7769279a06d476b348788bb11&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694680241%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DRNG%2520Series%2520V1.0.pdf%26text%3DAtlantic%2BMicrowave%2BRNG%2Bdatasheet%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FRNG%2520Series%2520V1.0.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3Dca8cacc7769279a06d476b348788bb11%26keyno%3D0%26nosw%3D1 \(accessed 14.09.2023\)</p></div><div data-bbox=\)](https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694680105&tld=ru&lang=en&name=ANG%20Series%20V1.0_2.pdf&text=Atlantic%20Microwave%20ANG%20datasheet&url=https%3A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FANG%2520Series%2520V1.0_2.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=6d9ec723eef1db34b553981b2b772202%26keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1694680105%26tld%3Dru%26lang%3Den%26name%3DANG%2520Series%2520V1.0_2.pdf%26text%3DAtlantic%2BMicrowave%2BANG%2Bdatasheet%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.atlanticmicrowave.com%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fproducts%2Fdownloads%2FANG%2520Series%2520V1.0_2.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3D6d9ec723eef1db34b553981b2b772202%26keyno%3D0%26nosw%3D1 (accessed 14.09.2023)</p></div><div data-bbox=)

programmable-noise-generator (accessed 27.11.2022)

52. DNG7500 datasheet. Available at: https://www.4test.ru/catalog/radioizmeritelnoe_oborudovanie/istochniki_shuma_1/istochniki_shuma_dng7500/ (accessed 27.11.2022)

53. VXI7000 datasheet. Available at: <https://www.rfglobalnet.com/doc/NoiseCom-vxi7000-series-vxibus-programmable-n-0002/> (accessed 27.11.2022)

54. NGX1000 datasheet. Available at: <https://boonton.com/Portals/0/datasheets/boonton-ngx1000-programmable-noise-generator-datasheet.pdf> (accessed 11.06.2023)

55. Generator шума Pokrov. Available at: <https://irsural.ru/poleznaya-informaciya/generator-shumapokrov/> (accessed 25.02.23)

56. Sonata-R3. Available at: <https://irsural.ru/szi/pemin/saz/sonata-r31-product-9.html> (accessed 25.02.23)

57. Sonata-RS3. Available at: <https://irsural.ru/szi/pemin/saz/sonata-rs3-sredstvo-aktivnoi-zashity-informacii-ot-utechki-po-seti-elektropitaniya-i-liniyam-zazemleniya-1-klass-product-20.html> (accessed 25.02.23)

58. Noise generator GSh-2500MS. Available at: <https://irsural.ru/szi/pemin/saz/gsh-2500ms-generator-shuma-isp-tidn464217010-product-377.html> (accessed 25.02.23)

59. Noise generator LGSh-221. Available at: <http://www.pps.ru/?part=catalog&product=243/> (accessed 25.02.23)

60. Noise generator LGSh-503. Available at: <http://www.pps.ru/?part=catalog&product=93/> (accessed 25.02.23)

61. NC346 datasheet. Available at: <https://noisecom.com/Portals/0/Datasheets/nc346-datasheet.pdf> (accessed 17.11.2022)

62. ПИИМ datasheet. Available at: <https://www.micran.ru/productions/IIS/kia/gshm/gshm/> (accessed 23.11.2022)

63. MT7600 datasheet. Available at: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1694680428&tld=ru&name=Maury_MT76xx.pdf&text=Maury%20Microwave%20MT7600&url=http%3A%2F%2Fwww.sglabs.it%2Fpublic%2FMaury_MT76xx.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=bf9ff9a63dd3a7d605739fa7911d70ac&keyno=0&serpParams=tm%3D1694680428%26tld%3Dru%26name%3DMAury_MT76xx.pdf%26text%3D%25D0%259Caury%2BMicrowave%2BMT7600%26url%3Dhttp%253A%2F%2Fwww.sglabs.it%2Fpublic%2FMaury_MT76xx.pdf%26lr%3D213%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3Dbf9ff9a63dd3a7d605739fa7911d70ac%26keyno%3D0 (accessed 14.09.2023)

64. X5M datasheet. Available at: <https://www.micran.ru/productions/IIS/kia/nfa/x5m/> (accessed 27.11.2022)

65. U1831C datasheet. Available at: <https://www.everythingrf.com/products/noise-sources/agilent-technologies/608-23-u1831c> (accessed 12.06.2023)

66. NW-MI datasheet. Available at: <https://noisewave.com/nw-mi.html/> (accessed 27.11.2022)

67. NW-ATE datasheet. Available at: <https://noisewave.com/nw-ate.html/> (accessed 27.11.2022)

Information about the authors

Sergey A. Vinokurov, Postgraduate of the Department of Formation and Processing of Radio Signal of NRU "MPEI", Engineer-developer of Radiocomp LLC, Engineer at the Institute of Radio Technologies and Electronics of the Russian Academy of Science n. a. V. A. Kotelnikov. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: radiophysics and electronics; devices for the formation and processing of radio signals.

Address: NRU "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: sergey.vinokurov@yandex.ru

Victor N. Kochemasov, Cand. Sci. (Eng.) (1976), General Director of Radiocomp LLC. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: radio engineering; devices for the generation and processing of radio signals; microwave filters; synthesizers of frequencies and signals.

Address: Radiocomp LLC, 42, Volgogradsky Ave., Moscow 109316, Russia

E-mail: kochemasovdv@gmail.com

Ansar R. Safin, Cand. Sci. (Eng.) (2014), Head of the Department of Radio Signal Generation and Processing, NRU "MPEI", Senior Researcher at the Institute of Radio Technologies and Electronics of the Russian Academy of Science n. a. V. A. Kotelnikov, Head of the Department of Radiocomp LLC. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: radiophysics and electronics; physics of magnetic phenomena; spintronics.

Address: NRU "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

E-mail: arsafin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>
