

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

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-

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

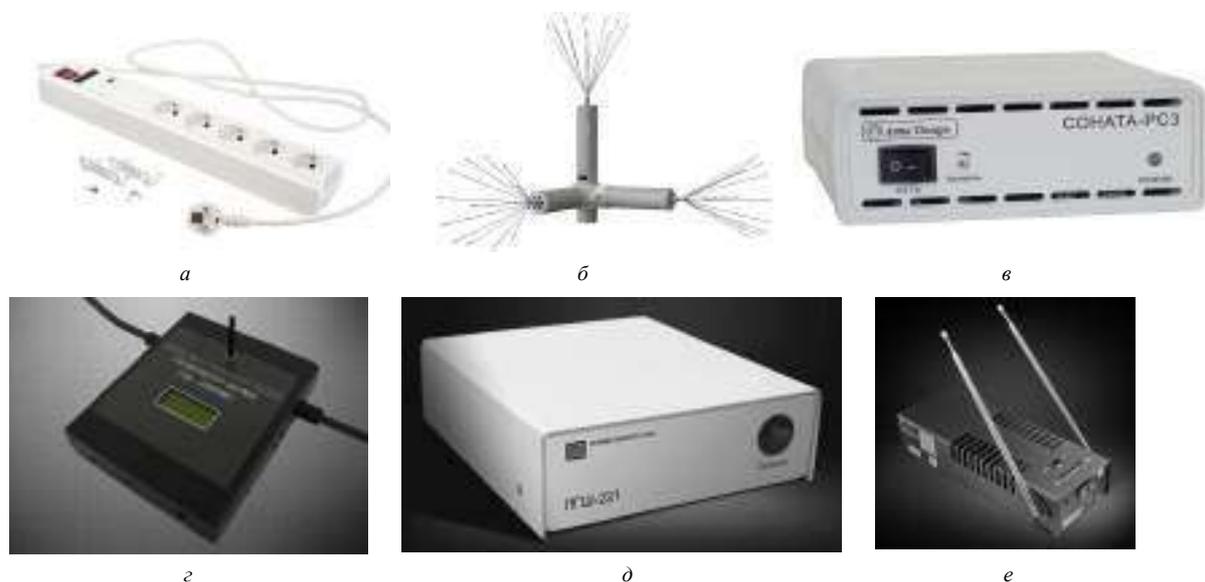


Рис. 15. Генераторы шума для информационной безопасности: *а* – "Покров" фирмы ООО "Радиоэлектронные системы"; *б* – "Соната-Р3" фирмы ООО "Анна"; *в* – "Соната-РС3" фирмы ООО "Анна"; *г* – ГШ-2500МС, разработанный ФГУП СКБ ИРЭ РАН; *д* – ЛГШ-221 фирмы АО "Лаборатория противодействия промышленному шпионажу";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

Fig. 15. Noise generators for information security: *a* – "Pokrov" company LLC "Radioelectronic systems"; *b* – "Sonata-R3" company LLC "Anna"; *v* – "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"; *e* – 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-Р3", производимый компанией ООО "Анна" (рис. 15, б), является средством активной защиты (САЗ) информации от утечки за счет побочных электромагнитных излучений и наводок [56]. "Соната-Р3" конструктивно может быть выполнен как система из трех САЗ "Соната-Р3.1", установленных вдоль трех взаимно-перпендикулярных осей, либо в виде единого блока.

"Соната-РС3", 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