

УДК 621.5

А. Г. КОСТЮКОВСКИЙ, С. И. ПОЛОВЕНЯ,

Белорусская государственная академия связи, Минск;

Ю. В. МЕЛЬНИК,

Государственный университет телекоммуникаций, Киев

Оценка ключевых показателей качества шума при разработке прибора типа ГИКШ-1

Рассмотрены основные методы измерения коэффициента шума в телекоммуникациях. На основе ключевых методов измерения коэффициента шума разработана структурная схема уникального прибора типа ГИКШ-1, позволяющего нагревать согласованную нагрузку иным способом, альтернативным тепловому нагреву. Эта схема позволяет задавать температуру шума в широких пределах как резко, так и плавно, адаптируясь под нужды потенциальных заказчиков и клиентов при измерениях температуры шума приемников и усилителей сигналов. Областью применения генератора типа ГИКШ-1 является образовательный процесс, производство маломощных низко-, средне- и высокочастотных транзисторов малой, средней и большой мощности, а также измерение показателей качества шума в приемниках сигналов в сотовой, спутниковой и космической связи.

Ключевые слова: тепловой шум; дробовой шум; шум квантовой структуры; качество шума; фактор шума; коэффициент шума; температура шума.

Введение

Шум, с которым мы имеем дело на практике, состоит из многих составляющих. Основные из них — это тепловой и дробовой шум. Тепловой шум возникает при флуктуациях электронов в проводниках, имеющих некую конечную температуру. Шумовой спектр, генерируемый тепловым шумом, по своей природе однороден на всех частотах. Дробовой шум возникает из-за квантовой стохастической природы электрического тока. Статистический анализ стохастического потока электронов показывает, что вариации тока имеют широкополосный характер (распределены в широкой полосе частот).

Есть и другие природные феномены, которые имеют квантовую структуру и генерируют случайный шум [1]. Несмотря на многообразие источников шума, у всех механизмов генерации шума есть одно свойство, общее с тепловым шумом: они имеют однородный спектр. Поэтому при оценке шума все его источники принято рассматривать как тепловой шум. *Качество шума*, генерируемого физическим источником, на практике оценивается по *мощности, полосе частот и статистическим характеристикам* [2].

Постановка задачи

Чем более слабые сигналы приходится обрабатывать в цифровых системах связи, тем большее значение приобретают такие параметры, как *уровень коэффициента ошибок Bit-Error (BER)*, который непосредственно зависит от чувствительности тракта обработки сигнала и, конечно, *коэффициента F шума*. Из перечисленных параметров коэффициент шума интересен в том плане, что

его можно использовать не только как *критерий оценки* работы всей приемной системы в целом, но и как *ключевую характеристику* отдельных компонентов этой системы, вплоть до транзисторов и полупроводниковых диодов.

И, действительно, когда разработчик контролирует коэффициент шума и усиление отдельных каскадов приемной системы, то это означает, что он контролирует всю систему в целом. Именно коэффициент шума — это зачастую тот параметр, который отличает одно приемное устройство от другого, один усилитель от другого, один транзистор от другого. Тот факт, что без использования понятия коэффициента шума сегодня сложно представить спецификацию на приемное устройство, подразумевает, что точность и повторяемость измерения данного параметра особенно важны при разработках и производстве приемников и усилителей сигналов, используемых в телекоммуникациях.

Фундаментальное определение коэффициента шума следующее:

$$F = (S_{in}/N_{in})/(S_{out}/N_{out}), \quad (1)$$

где S_{in}/N_{in} — отношение сигнал/шум на входе устройства; S_{out}/N_{out} — соотношение сигнал/шум на выходе устройства.

Поскольку все электронные устройства «шумят» и, соответственно, добавляют некоторое количество шума к сигналу, значение F всегда больше единицы. Поэтому международный Институт радиоинженеров (*Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*) официально принял следующее уточненное определение коэффициента шума:

$$F = (k \cdot T_0 \cdot B \cdot G + N_A)/k \cdot T_0 \cdot B \cdot G, \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T_0 — абсолютная температура, $T_0 = 290$ К как

опорное значение источников шума при измерениях коэффициента шума. Это значение соответствует $16,8^\circ\text{C}$ и $62,3^\circ$ по Фаренгейту. Спектральная плотность $k \cdot T$ тепловых шумов, генерируемая резистором на согласованную нагрузку в каждом герце электромагнитного спектра при данной температуре, равна $4 \cdot 10^{-21}$ Вт или минус 174 дБм; B — полоса частот, Гц; G — коэффициент усиления усилителя; N_A — некоторое количество шума, генерируемого в самом усилителе, Вт.

Опираясь на равенства (1) и (2), приходим к выводу, что измерения коэффициента F шума сводятся к измерениям уровня N_A шума, коэффициента G усиления и полосы частот B . Однако, несмотря на понятность данных величин, в практических измерениях формулами (1) и (2) фактически не пользуются. Это связано с тем, что измерить с большой точностью коэффициент G усиления в заданной полосе частот B чаще всего не представляется возможным. Все это вместе взятое породило множество косвенных методов измерения коэффициента шума.

Например, ведущие производители измерителей коэффициента шума (*Agilent Technologies* (правопреемник с 19 сентября 2013 г. — открытая акционерная компания *Keysight Technologies*), *Anritsu*, *Rohde & Schwarz*), последовательно разграничивают два термина: *фактор шума*, или F , и, собственно, *коэффициент шума NF*:

$$NF = 10 \cdot \lg F. \quad (3)$$

Упомянутые фирмы разработали множество обходных путей косвенного измерения коэффициента шума [3–6]. Это и метод с использованием генератора сигналов, и метод холодного источника (метод прямого измерения шума), и метод Y -фактора без коррекции, и метод Y -фактора с коррекцией второго каскада (например, все анализаторы спектра *Agilent* с опцией 219, все анализаторы спектра *Rohde & Schwartz* с опцией K3). Некоторые измерители коэффициента шума (*Agilent NFA*, *Agilent PSA* с опцией 219) могут автоматически считывать таблицу ENR (*Excess Noise Ratio* — избыточный коэффициент шума) из источника шума без участия оператора.

Во всех известных приборах с обходными путями косвенных измерений требуется длительная калибровка источника шума перед каждым измерением, что затрудняет процедуру измерения с заданной точностью в реальном масштабе времени. Кроме того, необходимо обратить внимание на то, что во время измерений и автоматических вычислений специализированные анализаторы оперируют не коэффициентом шума или фактором шума, а *эффективной температурой T_e шума*. При этом сам пересчет результатов измерений в коэффициент шума необходимо осуществлять в конце измерений как

$$F = 1 + T_e / 290. \quad (4)$$

Возникает задача по *разработке прибора нового типа — генератора избыточного коэффициента шума с заданными показателями качества шума в реальном масштабе времени*.

Результаты разработки прибора ГИКШ-1 и их обсуждение

Согласно приказу Ректора УО «Белорусская государственная академия связи» от 20.11.2015 №181 был разработан, изготовлен и внедрен в учебный процесс комплекс лабораторных работ по измерению шум-фактора приемников и усилителей сигналов [7–12]. Приемочная комиссия, назначенная приказом Ректора УО «Белорусская государственная академия связи» от 04.01.2016 №3, посчитала работу выполненной и принятой. Было также рекомендовано привлечь студенческое конструкторское бюро для разработки унифицированной конструкции комплекса технических средств анализа шум-фактора приемников и усилителей сигналов, используемых в телекоммуникациях. Организацией — производителем работ стала научно-исследовательская лаборатория прикладного анализа инфокоммуникационных систем (НИЛ ПАИС).

В результате отработки рекомендаций приемочной комиссии упомянутый комплекс технических средств анализа шум-фактора приемников и усилителей сигналов упростился. За счет разработки конструкции нового прибора — генератора избыточного коэффициента шума типа ГИКШ-1 указанный комплекс технических средств теперь состоит всего лишь из двух приборов: из генератора типа ГИКШ-1 и цифрового осциллографа BORDO. Интересно, что в ходе конструирования, чисто механического объединения в единой конструкции нескольких устройств, возник уникальный и единственный в своем роде прибор типа ГИКШ-1, позволяющий нагревать согласованную нагрузку иным способом, альтернативным тепловому нагреву. Таким образом, открывается перспектива достигать нагрева согласованной нагрузки вплоть до температур недр звезды, например Солнца [13].

Генератор типа ГИКШ-1 представлен на рис. 1.

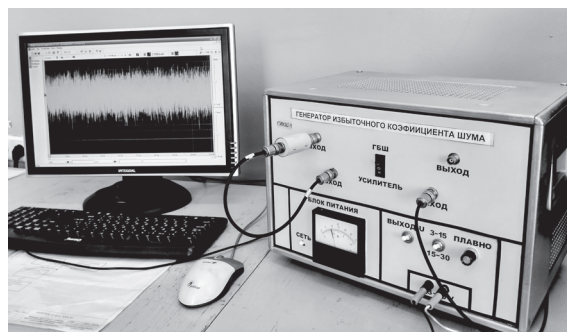


Рис. 1. Внешний вид генератора избыточного коэффициента шума типа ГИКШ-1

Питание генератора избыточного коэффициента шума типа ГИКШ-1 осуществляется от сети переменного тока (частота 50 Гц) с напряжением ~ 230 В. Здесь температура горячего источника может изменяться резко (три диапазона) и плавно. Студентам предстоит выполнить измерение температур в этих диапазонах, изучить зависимость между температурой согласованной нагрузки и генерируемой при этом мощностью шума. Измерение мощности на выходе объекта измерения (например, усилителя) осуществляется при подключении к его входу согласованной нагрузки (генератора шума) при температуре $T_0 = 290$ К (генератор шума выключен — холодный источник). Нагрев согласованной нагрузки (генератор шума включен — горячий источник) осуществляется до значения $T_{HOT} = T_0 + T_{EX}$.

Величину T_{EX}/T_0 или $(T_{HOT} - T_0)/T_0$ обычно называют *избыточным коэффициентом шума*, или ENR (*Excess Noise Ratio*), и производители источников шума нормируют ее в децибелах. При этом фактор шума определяется по формуле

$$F = (T_{EX}/T_0)/(Y - 1), \quad (5)$$

или

$$F = ENR/(Y - 1). \quad (6)$$

Тогда в логарифмическом масштабе выражение для коэффициента шума преобразуется к виду

$$NF = 10 \cdot \lg[10^{ENR/10}/(10^{Y/10} - 1)], \quad (7)$$

где отношение мощностей P_2/P_1 горячего P_2 к холодному P_1 источнику шума (рис. 2) исторически называется *Y-фактором*, или Y .

Структурная схема комплекса технических средств анализа шум-фактора приемников и усилителей сигналов в режиме измерения Y -фактора представлена на рис. 2.

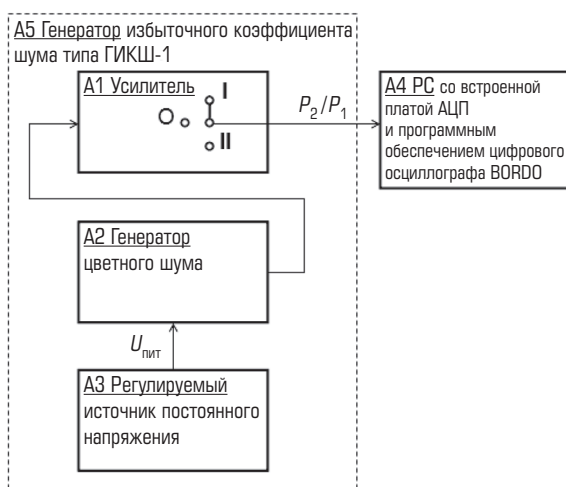


Рис. 2. Комплекс технических средств анализа шум-фактора приемников и усилителей сигналов в режиме измерения Y -фактора

Генератор цветного шума А2 своим выходом подключается к усилителю А1 (см. рис. 2), чтобы смоделировать линии различных услуг. Здесь тем-

пературу шума можно регулировать резко в трех диапазонах (положение переключателя «О», «I» или «II»). На вход генератора цветного шума А2 подается питание от регулируемого источника постоянного напряжения А3. Регулируя уровень напряжения на входе генератора цветного шума А2, задают температуру шума плавно.

Целью разработки генератора типа ГИКШ-1 является внедрение в образовательный процесс для проведения лабораторных занятий по измерению шум-фактора приемников и усилителей сигналов, а также по изучению показателей качества шума по учебной дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация в телекоммуникациях» для студентов специальности 1-45 01 01 «Инфокоммуникационные технологии» (по направлениям). Генератор также позволяет давать оценку коэффициента шума в электронных устройствах при их производстве и эксплуатации, когда отсутствуют современные измерительные приборы и эталоны для их калибровки.

Для формирования у студентов навыков проведения научно-исследовательских работ согласно требованиям научной школы УО «Белорусская государственная академия связи» генератор типа ГИКШ-1 укомплектован согласованными нагрузками на 50 и 600 Ом, а также лабораторным практикумом. Кроме того, разработаны и изготовлены дидактические материалы в виде учебного наглядного пособия (стенд настенного типа); сформулирована проблема долгосрочного развития тематики НИР; разработан логотип проблемы долгосрочного развития НИЛ ПАИС. В качестве элемента научно-исследовательской работы студентам дополнительно предлагается самостоятельно измерить коэффициент усиления объекта измерения в различных режимах его работы, что является непростой задачей.

Лабораторный практикум «Измерение и анализ шум-фактора приемников и усилителей сигналов» в составе трех лабораторных работ и двух приложений опубликован в УО «Белорусская государственная академия связи» [14], содержит теорию и практику измерения шума; перспективные критерии оценки работоспособности системы; методы измерения коэффициента шума; три лабораторных работы от прямого метода через косвенный метод к универсальному методу измерения шум-фактора приемников и усилителей сигналов, используемых в телекоммуникациях. Здесь рассматриваются основные методы измерения коэффициента шума в телекоммуникациях. Изучаются принципы измерения отношения сигнал/шум SNR (*Signal to Noise Ratio*) и избыточного коэффициента шума ENR.

Таким образом, лабораторный практикум задуман как комплекс лабораторных работ по

измерению шум-фактора приемников и усилителей сигналов и представляет собой открытую систему для наращивания количества лабораторных работ и вновь вовлекаемых дисциплин, ориентированных на будущих заказчиков и адаптируемых к их нуждам.

Заключення

Выполнен анализ ключевых методик измерения коэффициента шума. Установлено, что ведущие производители используют косвенные методы измерения, которые были приняты за основу при разработке структурной схемы уникального прибора типа ГИКШ-1, позволяющего нагревать согласованную нагрузку иным способом, альтернативным тепловому нагреву, задавать температуру шума в широких пределах как резко, так и плавно.

Установлено преимущество понятия эффективной температуры шума, которое заключается в том, что это понятие подводит общее основание под измерения случайного электрического шума, генерируемого любым источником. Показано, что схема прибора типа ГИКШ-1 позволяет адаптироваться под нужды потенциальных заказчиков при измерениях температуры шума приемников и усилителей сигналов, используемых в телекоммуникациях.

Областью применения генератора типа ГИКШ-1 является образовательный процесс, производство маломощных низко-, средне- и высокочастотных транзисторов малой, средней и большой мощности, а также измерение показателей качества шума в приемниках и усилителях сигналов в сотовой, спутниковой и космической связи. Генератор типа ГИКШ-1 разработан как открытая система, адаптируемая к нуждам будущих заказчиков.

Список использованной литературы

1. *Baranovsky O., Gorbadey O., Zenevich A. Quantum Method of Secure Key Distribution in Optical Fiber Communication // The Second International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017).*

2. *Барановский О. К., Зеневич А. О., Горбадей О. Ю. Способ передачи секретного ключа по*

*волоконно-оптической линии связи // Весник су-
вязі. 2016. №4(138). С. 43–46.*

3. *Agilent. Noise Figure Measurement Accuracy — The Y-Factor Method. Application note 57-2.*

4. *Vondran D. Vector Corrected Noise Figure Measurements // Microwave Journal, March 1999.*

5. *Anritsu. Noise Figure Accuracy. Application Note No. 11410-00227*

6. *Friis H. T. Noise Figures of Radio Receivers. Proc. of the IRE, July, 1944.*

7. *Техническое задание на выполнение ОКР «Разработка комплекса технических средств анализа шум-фактора приемников и усилителей сигналов, используемых в телекоммуникациях» от 25.03.2015 г.*

8. *Костюковський А. Г. Устройство формирования широкополосного шума // Современные средства связи. Минск: УО ВГКС, 2015. С. 86–88.*

9. *Техническое задание на выполнение НИР «Комплекс лабораторных работ по измерению шум-фактора приемников и усилителей сигналов» от 22.04.2016 г.*

10. *Костюковський А. Г. Комплекс лабораторных работ по измерению шум-фактора приемников и усилителей сигналов // Современные средства связи. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2016. С. 75–76.*

11. *Акт приемки НИР «Комплекс лабораторных работ по измерению шум-фактора приемников и усилителей сигналов» от 07.02.2017 г.*

12. *Акт внедрения результатов НИР «Комплекс лабораторных работ по измерению шум-фактора приемников и усилителей сигналов» в образовательный процесс от 16.02.2017 г.*

13. *Костюковський А. Г., Кот М. А., Серак Н. В. Генератор избыточного коэффициента шума типа ГИКШ-1 // Современные средства связи. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2017. С. 79–80.*

14. *Костюковський А. Г. Измерение и анализ шум-фактора приемников и усилителей сигналов: лабораторный практикум для студентов специальностей 1-45 01 01 — Инфокоммуникационные технологии (по направлениям); 1-45 01 02 — Инфокоммуникационные системы (по направлению). Минск: Белорусская государственная академия связи, 2017. 48 с.*

Рецензент: доктор техн. наук, профессор С. В. Козелков, Государственный университет телекоммуникаций, Киев.

О. Г. Костюковський, С. І. Половня, Ю. В. Мельник

ОЦІНЮВАННЯ КЛЮЧОВИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ШУМУ ПРИ РОЗРОБЦІ ПРИЛАДУ ТИПУ ГІКШ-1

Розглянуто основні методи вимірювання коефіцієнта шуму в телекомунікаціях. На основі ключових методик вимірювання коефіцієнта шуму розроблено структурну схему унікального приладу типу ГІКШ-1, що дозволяє нагрівати узгоджене навантаження іншим способом, альтернативним тепловому нагріванню. Ця схема дозволяє задавати температуру шуму в широких межах як різко, так і плавно, адаптуватися під потреби потенційних замовників і клієнтів при вимірюванні температури шуму приймачів

і підсилювачів сигналів. Областю застосування генератора типу ГКШ-1 є освітній процес, виробництво тихих низько-, середньо- і високочастотних транзисторів малої, середньої та великої потужності, а також вимірювання показників якості шуму в приймачах сигналів у стільниковому, супутниковому та космічному зв'язку.

Ключові слова: тепловий шум; дробовий шум; шум квантової структури; якість шуму; фактор шуму; коефіцієнт шуму; температура шуму.

A. G. Kostyukovsky, S. I. Polovena, Yu. V. Melnik

ASSESSMENT OF KEY INDICATORS OF QUALITY OF NOISE AT DEVELOPMENT OF THE GENR-1 TYPE DEVICE

The basic methods for measuring the noise figure in telecommunications are considered. Based on the key techniques for measuring the noise figure, a structural diagram of a unique device of the GENR-1 type was developed, which makes it possible to heat the coordinated load by another method alternative to thermal heating. This scheme allows you to set the noise temperature within wide limits, both roughly and smoothly, to adapt to the needs of potential clients and customers when measuring the noise temperature of receivers and signal amplifiers. The field of application of the GENR-1 generator is the educational process, the production of low-noise low-frequency, mid-frequency and high-frequency transistors of small, medium and high power, as well as measurement of noise quality in signal receivers in cellular, satellite and space communications.

Keywords: thermal noise; shot noise; noise of quantum structure; noise quality; noise factor; noise coefficient; noise temperature.

УДК 004.42

О. Б. ПРИДИБАЙЛО, здобувач,

Державний університет телекомунікацій, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ ВІДДАЛЕНОГО ПРОГРАМУВАННЯ НА БАЗІ MATLAB WEB SERVER

У статті розглянуто, в який спосіб Matlab Web Server (MWS) і віддалені обчислення застосовуються для розв'язання різноманітних математичних задач. Зазначена технологія має у своєму розпорядженні велику бібліотеку стандартних функцій.

Завдяки MWS при роботі користувачів комп'ютерних мереж із математичним пакетом Matlab відпадає необхідність в установленні даного досить ресурсомісткого програмного забезпечення на локальних комп'ютерах, оскільки всі обчислення виконує сервер.

Ключові слова: MATLAB Web Server; програмний додаток; *m*-файл; режим віддаленого програмування; сервер.

Вступ

MATLAB Web Server (MWS) [1] дозволяє розробляти програми для роботи в інтернеті, використовуючи стандартні компоненти MATLAB. Робота самого додатка відбувається на сервері, а користувач взаємодіє з ним через будь-який веб-браузер. Щоб користуватися програмою, користувач не має потреби залучати MATLAB або додатковий компонент, встановлюваний (*plug-in*) для браузера.

Програми MATLAB Web Server — це комбінація *m*-файлів, гіпертекстової розмітки (HTML) та графіки. Для розробки програми висуваються тільки дві вимоги: знання як програмного забезпечення MATLAB, так і базового HTML.

Застосування MWS особливо продуктивне в дистанційному навчанні. Навчальні програми, що моделюють фізичні або інші явища і дозволяють подавати результати розрахунків у вигляді графічних і анімаційних зображень, виступають дієвим інструментом навчання.

Основна частина

MATLAB WEB Server використовує стандартні компоненти певного середовища програмування, такі як Python, MATLAB, Simulink тощо. HTML-документи слугують графічним інтерфейсом для розподілених додатків середовищ програмування. Отже, користувач не має потреби не тільки встановлювати на свій ПК дане середовище, а й вникати в тонкощі його роботи. Адже сам принцип організації цих HTML-документів спирається на концепцію введення користувачем лише певної кількості параметрів та ініціалізацію процесу обчислень. Таким чином, MWS дозволяє розгорнути програмний додаток (*m*-додаток) у мережі, скориставшись стандартними WEB-технологіями.

Блок-схему організації комплексу віддаленого доступу на основі MWS наведено на рис. 1.