

## Аналоговый генератор низкочастотного шума с регулируемым показателем формы спектра

В.А. Сергеев<sup>1,2</sup>, С.Е. Резчиков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск, Россия

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

sva@ulstu.ru

Параметры низкочастотного (НЧ) шума со спектром вида  $G(f) \sim 1/f^\gamma$  широко используются для диагностики качества и надежности полупроводниковых приборов. Для метрологического обеспечения средств измерения параметров НЧ-шумов возникает необходимость разработки генератора НЧ-шума с регулируемым показателем формы спектра  $\gamma$ . В работе предложена структурная схема генератора НЧ-шума с источником белого шума и многозвенным RC-фильтром с переменными и дополнительными резисторами в RC-звеньях. Применение в RC-звеньях фильтра сдвоенных переменных резисторов позволяет изменять показатель формы спектра  $\gamma$  в пределах от 0 до 4 в диапазоне частот до шести декад. Экспериментальная проверка генератора с шестизвенным фильтром показала возможность синтеза сложного спектра НЧ-шума с показателем формы спектра шума, близким к установленному оператором значению.

**Ключевые слова:** низкочастотный шум; спектр шума; показатель формы спектра; шумовые измерения; генератор; перестраиваемый фильтр

**Для цитирования:** Сергеев В.А., Резчиков С.Е. Аналоговый генератор низкочастотного шума с регулируемым показателем формы спектра // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 6. – С. 635–639. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-6-635-639

## Analog Generator of LF-Noise with an Adjustable Spectrum Form Indicator

V.A. Sergeev<sup>1,2</sup>, S.E. Rezchikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia

<sup>2</sup>Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

sva@ulstu.ru

**Abstract:** The parameters of low-frequency (LF) noise with a look spectrum  $G(f) \sim 1/f^\gamma$  are widely used for diagnostics of quality and reliability of semiconductor devices. For metrological support of the gages for the LF-noise parameters the problem of development of the LF-noise generator with an adjustable spectrum form indicator  $\gamma$  arises. The block diagram of the LF-noise generator with a source of white noise and the multilink RC-filter with variable and additional resistors in RC-links has been proposed. An application in the RC-links of the filter of dual variable resistors permits to change the spectrum form indicator  $\gamma$  ranging from 0 to 4 in the frequency range up to 6 decades. The experimental check of the generator with the 6-unit filter has shown an opportunity to synthesize a difficult range of LF-noise with the noise spectrum form indicator close to the value established by an operator.

**Keywords:** low-frequency noise; a noise spectrum; a spectrum form indicator; noise measurements; the generator, the adjustable filter

**For citation:** Sergeev V.A., Rezchikov S.E. Analog generator of LF-noise with an adjustable spectrum form indicator. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 6, pp. 635–639. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-6-635-639

Уровень электрического шума ограничивает функциональные свойства электронных приборов и является информативным диагностическим параметром [1]. Так, для диагностики качества полупроводниковых приборов широко используются параметры низкочастотного (НЧ) шума со спектром вида  $G(f) \sim 1/f^\gamma$  [1], в частности показатель формы спектра  $\gamma$ . Для тестирования методов и средств измерения параметров НЧ-шума с различным значением показателя формы спектра необходим источник образцового НЧ-шумового сигнала [2]. Генераторы НЧ-шума с перестраиваемой  $\gamma$  в настоящее время серийно не производятся. Научных работ по синтезу генераторов НЧ-шума с регулируемой  $\gamma$  авторам не удалось найти. Некоторые модели генераторов шума могут производить  $1/f$ -шум [3]. Таким образом, возникает необходимость разработки генератора НЧ-шума с регулируемым показателем спектра.

Известен способ генерирования  $1/f$ -шума на основе фликкер-шума первичного источника [3]. Другой способ – фильтрация белого шума [4] аналоговым фильтром [5], изменение коэффициента передачи которого за пределами полосы пропускания составляет  $-3$  дБ/окт. Простейший RC-фильтр нижних частот (ФНЧ) имеет спад коэффициента передачи за пределами полосы пропускания  $-6$  дБ/окт. Вариант схемы пассивного RC-фильтра с изменением коэффициента передачи  $-3$  дБ/окт приведен в [4]. Согласно диапазону изменения значения  $\gamma$  реальных полупроводниковых изделий, полноценный генератор НЧ-шума должен обеспечивать перестройку  $\gamma$  генерируемого шума в пределах от 0 до 4 [6, 7].

Одно из наиболее принятых объяснений вида  $1/f$ -спектра НЧ-шума – суперпозиция лоренцианов [8], спектр которых аналогичен амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) ФНЧ. Требуемую форму АЧХ можно получить путем составления сложного фильтра из RC-звеньев, различающихся значением емкости конденсаторов. Для того чтобы фильтр был перестраиваемым, резистор RC-звена должен быть переменным; чтобы каждое такое звено ослабляло подаваемый шум только в определенной полосе, необходимо ввести в схему каждого RC-звена ФНЧ дополнительный резистор. Выходное напряжение будет сниматься с последовательно включенных конденсатора, дополнительного резистора и части переменного резистора (через вывод движка). При соответствующем выборе номинала дополнительного резистора диапазон регулировки показателя спектра такого фильтра ограничивается значениями  $\gamma = 0 \dots 1$ , постоянная крутизна спада АЧХ достигается в диапазоне менее декады. Для расширения частотного диапазона необходимо строить фильтр из нескольких звеньев; применив двоянный резистор, можно получить синхронную регулировку  $\gamma$  в диапазоне около полутора декад. ФНЧ с тремя двоянными переменными резисторами позволит регулировать значение  $\gamma$  в диапазоне почти шести декад. АЧХ сложного ФНЧ будет определяться произведением АЧХ отдельных звеньев:

$$\lg(K_P(f_{lg})) = \sum_{n=1}^N \lg \left( \frac{(R_{огр} + R_{пер})^2 + (k_{ч.с}^{n-1}/2\pi f C_1)^2}{(R_{огр} + R_{полн})^2 + (k_{ч.с}^{n-1}/2\pi f C_1)^2} \right), \quad (1)$$

где  $f_{lg}$  – логарифм частоты;  $N$  – число звеньев;  $R_{огр}$  – сопротивление ограничительного резистора;  $k_{ч.с}$  – отношение частот среза звеньев ФНЧ;  $f$  – частота;  $C_1$  – емкость конденсатора первого RC-звена;  $R_{полн}$ ,  $R_{уст}$  – полное и установленное сопротивление переменного резистора соответственно.

Значения показателя формы спектра НЧ-шума генератора на ФНЧ для различных значений сопротивлений  $R_{уст}$  RC-звеньев рассчитывались при  $N = 6$ ,  $C_1 = 15$  мкФ,  $k_{ч.с} = 6,9$ ,  $R_{полн} = 5$  кОм и  $R_{огр} = 1,3$  кОм. Емкость конденсатора первого звена (максимальная в фильтре) выбрана 15 мкФ, чтобы не использовать шумящие электролитические конденсаторы. Полное активное

сопротивление каждого звена, рассчитанное по формуле для частоты среза ФНЧ из условия обеспечения нижней частоты рабочего диапазона генератора 1,5 Гц, равно 6,3 кОм. Отношение емкостей соседних звеньев рассчитано для обеспечения шестью звеньями пяти декад рабочего диапазона частот:  $k_{ч.с} = 6,9 \approx \sqrt[6]{10^5}$ . Значение ограничивающего резистора  $R_{огр} = 1,3$  кОм рассчитано с помощью формулы (1) для обеспечения конечного значения шкалы перестраиваемого фильтра (ПФ), которое выбрано равным  $\gamma_k = 1,2$ . Средние значения показателей формы спектра по выражению (1):  $\gamma_{2,2к\Omega} = 0,51 \pm 0,06$ ,  $\gamma_{500\Omega} = 1,015 \pm 0,080$ . Зависимость систематической погрешности от частоты близка к синусоидальной.

Для реализации многозвенного перестраиваемого RC-фильтра можно использовать цифровые потенциометры, но для снижения расходов при апробации идеи применены сдвоенные потенциометры с линейной характеристикой. Структурная схема разработанного генератора НЧ-шума приведена на рис.1. Блок генератора белого шума (ГБШ) позволяет использовать генератор НЧ-шума без внешнего источника белого шума. Блок « $\gamma + 2$ » представляет собой обычный ФНЧ с низкой частотой среза. ПФ, построенный по рассчитанным параметрам, обеспечивает регулировку значений в диапазоне  $\gamma = 0 \dots 1$ .

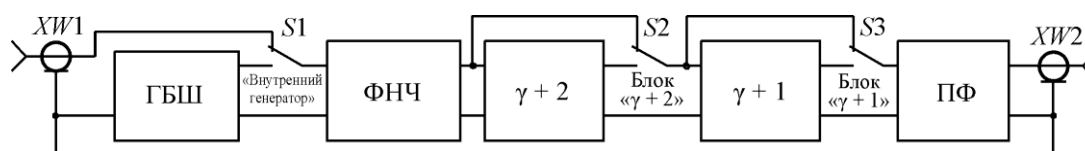


Рис.1. Структурная схема генератора НЧ-шума с регулируемым показателем формы спектра  
Fig.1. Block diagram of LF-noise generator with adjustable spectral exponent

Результаты исследования варианта генератора только с блоком ПФ представлены в работе [9]. В настоящей работе приведены результаты построения и экспериментального исследования генератора с блоком « $\gamma + 1$ ». Фильтр « $\gamma + 1$ » для преобразования белого шума в НЧ-шум с  $\gamma = 1$  построен из шести неперестраиваемых звеньев на печатной плате размером  $10 \times 20$  мм [10]. По схеме собран генератор НЧ-шума и исследованы спектральные характеристики его шумовых сигналов. Для этого на вход XW1 с ГБШ Г2-37 подавался входной шумовой сигнал. Сигнал с выхода XW2 генератора НЧ-шума усиливался нановольтметром Uniрап 233 и оцифровывался модулем сбора данных E20-10. Усреднение осуществлено объединением соседних спектральных составляющих. Результаты измерения спектра для пяти установленных значений  $\gamma_{уст} = 0,5; 1; 1,5; 2; 3$  показали, что реальные показатели спектра НЧ-шума на выходе генератора близки к установленным значениям (рис.2).

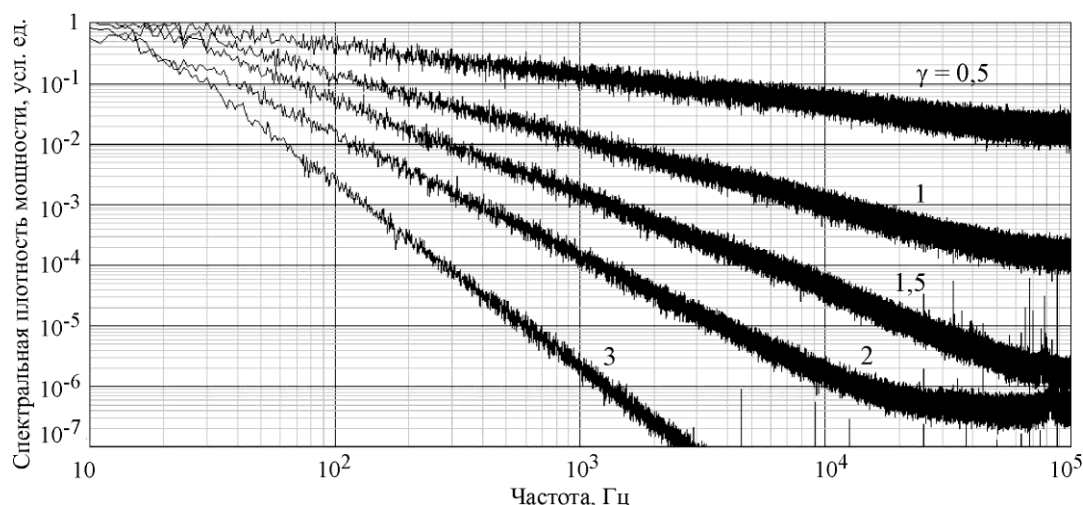


Рис.2. Спектры НЧ-шума с разными значениями показателя спектра на выходе генератора  
Fig.2. LF-noise spectra with different spectral exponents at generator output

Таким образом, предложенный регулируемый генератор НЧ-шума позволяет синтезировать спектр НЧ-шума с заданным значением  $\gamma_{уст}$ .

### Литература

1. Горлов М.И., Сергеев В.А. Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 406 с.
2. Сергеев В.А., Резчиков С.Е. Методическая погрешность измерений показателя степени частотной зависимости спектра низкочастотного шума // Измерительная техника. – 2015. – №10. – С. 55–59.
3. Резчиков С.Е. Краткий обзор способов и устройств генерирования электрического шума // Радиоэлектронная техника. – 2013. – №1. – С. 165–167.
4. Bohn D. Audio handbook. National Semiconductor Corporation. – Santa Clara, Ca.: The Corporation, 1976. – 199 p.
5. Keele D.B.J. The design and use of a simple pseudo random pink-noise generator // J. of the Audio Engineering Society. – 1973. – Vol. 21. – No 1. – P. 33–41.
6. A comparative analysis of spectral exponent estimation techniques for  $1/f^\beta$  processes with applications to the analysis of stride interval time series / A. Schaefer et al. // J. of Neuroscience Methods. – 2014. – Vol. 222. – P. 118–130.
7. Резчиков С.Е. Генератор низкочастотного шума с регулируемым показателем формы спектра // Lashkaryov's readings: Young Scientists Conference on Semiconductor Physics. – Kiev, Ukraine, 2017. – P. 24–25.
8. Левинштейн М.Е. Шум  $1/f$  в полупроводниках и полупроводниковых приборах // Международная зимняя школа по физике полупроводников (Санкт-Петербург; Зеленогорск, 27 февраля – 1 марта 2004 г.). – 2004. – С. 78–84.
9. Резчиков С.Е. Синтез структурной схемы перестраиваемого генератора НЧ-шума // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2017. – Т. 17. – №3. – С. 855–858.
10. Резчиков С.Е., Сергеев В.А. Синтез генераторов НЧ-шума и анализ частотной зависимости показателя формы их спектра // Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика: тез. докл. XII Всеросс. конф. молодых ученых (5–7 сентября 2017 г.). – Саратов, 2017. – С. 219–220.

Поступило 25.04.2018 г.; принято к публикации 25.09.2018 г.

**Сергеев Вячеслав Андреевич** – доктор технических наук, профессор, директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2), заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и нанoeлектроники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32), [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru)

**Резчиков Сергей Евгеньевич** – аспирант базовой кафедры радиотехники, опто- и нанoeлектроники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32), [s.rezchikov@ulstu.ru](mailto:s.rezchikov@ulstu.ru)

### References

1. Gorlov M.I., Sergeev V.A. *Modern diagnostic methods for quality and reliability control of semiconductor products*. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2015. 406 p. (in Russian).
2. Sergeev V.A., Rezchikov S.E. The systematic error of measurement of the exponent of the frequency dependence of the spectrum of low-frequency noise. *Izmeritel'naya Tehnika = Measurement Techniques*, 2015, no. 10, pp. 55–59. (in Russian).
3. Rezchikov S.E. A brief overview of the methods and devices for generating electrical noise. *Radioelektronnaya Tehnika = Radioelectronic equipment*, 2013, no. 1. pp. 65–167. (in Russian).
4. Bohn D. *Audio handbook*. National Semiconductor Corporation. Santa Clara, Ca.: The Corporation, 1976. 199 p.
5. Keele D.B.J. The design and use of a simple pseudo random pink-noise generator. *Journal of the Audio Engineering society*, 1973, vol. 21, no. 1, pp. 33–41.
6. Schaefer A. et al. A comparative analysis of spectral exponent estimation techniques for  $1/f^\beta$  processes with applications to the analysis of stride interval time series. *Journal of Neuroscience Methods*, 2014, vol. 222, pp. 118–130.
7. Rezchikov S.E. Low-frequency noise generator with adjustable spectral exponent. «Lashkaryov's readings»: *Young scientists conference on semiconductor physics*, Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 24–25. (in Russian).
8. Levinshstein M.E. Noise  $1/f$  in semiconductors and semiconductor devices. *International Winter School on Semiconductor Physics*. Saint-Petersburg – Zelenogorsk, 2004, pp. 78–84. (in Russian).
9. Rezchikov S.E. Synthesis of block diagram of tunable low-frequency noise generator. *Fundamental'nyye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya = Fundamental problems of radioelectronics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 855–858. (in Russian).

10. Rezchikov S.E., Sergeev V.A. Synthesis of LF noise generators and analysis of the frequency dependence of their spectral exponents. *Nanoelectronics, Nanophotonics and Nonlinear Physics, XII conference for young scientists: proceeding of* , Saratov, 2017, pp. 219–220. (in Russian).

Submitted 25.04.2018; Accepted 25.09.2018.

**Information about the authors:**

**Vyacheslav A. Sergeev** – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov str., 48/2), Head of the Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz str., 32), sva@ulstu.ru

**Sergei E. Rezchikov** – PhD student of the Radio Engineering, Opto- and Nanoelectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz str., 32), s.rezchikov@ulstu.ru

**Вниманию читателей журнала  
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

Оформить годовую подписку на электронную  
версию журнала можно на сайтах

- **Научной электронной библиотеки:** [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)
- **ООО «Агентство «Книга-Сервис»:** [www.rucont.ru](http://www.rucont.ru); [www.akc.ru](http://www.akc.ru);  
[www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru)
- **ООО «УП Урал-Пресс»:** [www.delpress.ru](http://www.delpress.ru)
- **ООО «ИВИС»:** [www.dlib.eastview.ru](http://www.dlib.eastview.ru)