

УДК 621.382.8.017.7

В.А. Сергеев, С.Е. Резчиков

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ БЕЛОГО ШУМА

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, доцент, окончил физический факультет Горьковского государственного университета. Директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, заведующий базовой кафедрой «Радиотехника, опто- и нанoeлектроника» Ульяновского государственного технического университета при УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Имеет монографии, статьи и изобретения в области моделирования и исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Резчиков Сергей Евгеньевич, окончил радиотехнический факультет УлГТУ. Аспирант базовой кафедры «Радиотехника, опто- и нанoeлектроника» УлГТУ при УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Имеет научные публикации в области автоматизации измерений и исследования шумовых характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем. [e-mail: s.rezchikov@ulstu.ru].

Аннотация

Представлен краткий анализ методов измерения параметров низкочастотного (НЧ) шума со спектром вида $1/f^\gamma$. Приведены оценки погрешности измерения спектральной плотности мощности (СПМ) и показателя γ формы спектра с учетом влияния уровня белого шума. Предложены процедуры измерения показателя γ формы спектра, минимизирующие суммарную погрешность определения γ , по результатам измерения СПМ шума на трех частотах при последовательной и параллельной фильтрациях. Суть оптимизации при последовательной фильтрации сводится к оптимальному распределению заданного полного времени измерения между измерениями на трёх разных частотах при заданном отношении частот, а при параллельной фильтрации – к определению оптимального отношения частот измерения СПМ шума при заданном полном времени измерения. Приведены оценки методической погрешности измерения γ при реализации различных процедур измерения в зависимости от значения γ . Показано, что оптимизация измерительных процедур позволяет уменьшить погрешность определения значения γ в 1,5–2 раза.

Ключевые слова: низкочастотный шум, спектральная плотность мощности, показатель формы спектра, измерение, погрешность, оптимальные процедуры.

THE OPTIMIZATION OF PROCEDURES FOR MEASURING THE SEMICONDUCTOR DEVICES' PARAMETERS OF LOW-FREQUENCY NOISE INFLUENCED BY WHITE NOISE

Viacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Engineering, Associate Professor; graduated from the Faculty of Physics of Gorky State Technical University; Head of Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of the Russian Academy of sciences (RAS); Head of the Department of Radioengineering, Opto and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University at Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov IRE; an author of monographs, articles, and inventions in the field of researching and simulating semiconductor device and integrated circuit performance, and measuring their thermal characteristics. e-mail: sva@ulstu.ru.

Sergei Evgenevich Rezchikov, graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Postgraduate Student of the Base Department of Radioengineering, Opto and Nanoelectronics at the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS; an author of articles in the field of measurement automation and noise characteristics research of semiconductor devices and integrated circuits. e-mail: s.rezchikov@ulstu.ru.

Abstract

The brief analysis of techniques for measuring the parameters of low-frequency (LF) noise with $1/f^\gamma$ -type spectrum has been proposed. The estimation of measurement error of power spectral density (PSD) and γ -rays spectrum index are given by

taking into account the influence of white-noise level. Based on the results of noise spectral power density measurements implemented at three frequencies when series and parallel filtering, authors propose procedures of measuring the index of γ -rays spectrum that minimize a total inaccuracy of γ value determination. The essence of optimization in case of serial filtering reduces to the optimum distribution of preset overall measurement time between measurements at the first, second and additional frequencies in case of the given frequency ratio, and when parallel filtering, to the determination of the optimum frequency ratio of measuring the noise PSD in case of the preset overall measurement time. A systematic measurement error of γ value has been estimated while implementing of various measurement procedures depending on γ value. The estimations are presented in the article. It is shown that the optimization of measuring procedures allows to reduce an error of the γ value determination by 1.5 to 2 times.

Key words: low-frequency noise, power spectral density, index of spectrum form, measurement, error, optimum procedures.

ВВЕДЕНИЕ

Для неразрушающего диагностического контроля качества изделий электронной техники (ИЭТ) широко используются параметры их собственного низкочастотного (НЧ) шума [1–3] со спектром вида

$$G(f) \sim A/f^\gamma, \quad (1)$$

где $G(f)$ – спектральная плотность мощности (СПМ) на частоте f ; A – параметр, характеризующий уровень шума; γ – показатель степени частотной зависимости спектра.

Этот вид шума называют еще фликкер-шумом, и его параметры широко используются не только в качестве диагностических параметров в задачах неразрушающего контроля качества ИЭТ, но и для оценки функциональных возможностей электронных приборов и устройств [3]. Адекватность оценок и эффективность контроля качества, очевидно, определяются точностью измерения параметров НЧ-шума.

В качестве информативного параметра многими исследователями [2–4] используется показатель степени γ частотной зависимости СПМ шума. Значения этого параметра могут изменяться в широком диапазоне: от 0,5 до 3 и более, однако в большинстве работ по диагностике качества ИЭТ на основе показателя степени γ нет оценок погрешности и условий измерения этого параметра. Влияние значения γ на погрешность измерения СПМ НЧ-шума было рассмотрено в работах [4–7]. Однако рекомендаций по выбору оптимальных условий и процедур измерения собственно значения γ в доступных нам литературных источниках не приводится.

В работе [8] рассмотрены погрешность измерения показателя степени по значениям СПМ на двух частотах без учета влияния уровня теплового и дробового шумов ИЭТ на результат измерения СПМ. Предложены процедуры, позволяющие минимизировать суммарную погрешность измерения γ путем распределения заданного полного времени измерения, при фиксированном отношении частот, между измерениями на первой и второй частотах, а при параллельной фильтрации – путем выбора оптимального отношения частот измерения СПМ шума при заданном полном времени измерения.

На практике, исследователь имеет дело со смесью белого шума (тепловой и дробовой) и НЧ-шума, имеющей СПМ:

$$G_{nm}(f) = A/f^\gamma + G_0, \quad (2)$$

где A – некоторая постоянная, f – частота, γ – показатель спектра, G_0 – уровень белого шума.

Частоту f_0 , на которой уровень НЧ-шума равен уровню белого шума, принято называть частотой перегиба спектра шума.

Хотя в настоящее время для измерения СПМ широко используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ), некоторые исследователи предпочитают использовать набор аналоговых фильтров. В ряде работ рассматриваются вопросы оптимальной ширины полосы пропускания анализирующего фильтра [9]. При этом вопрос оценки погрешности измерения параметров НЧ-шума остается без внимания.

В данной статье рассмотрено влияние уровня смеси теплового и дробового шумов ИЭТ на результат измерения СПМ, с учетом того, что положение точки перегиба на реальном спектре шума ИЭТ априори неизвестно. Анализ методической погрешности измерения значения γ и выбор процедур, минимизирующих эту погрешность, с учетом влияния уровня теплового и дробового шумов ИЭТ представляет актуальную задачу, поскольку при измерении шумовых характеристик и определении параметров НЧ-шума в литературе не приводится оценок погрешности в зависимости от условий измерения.

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ БЕЛОГО ШУМА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ СТЕПЕНИ γ ПО ЗНАЧЕНИЯМ СПМ НА ДВУХ ЧАСТОТАХ

Для определения показателя степени γ в частотной зависимости спектра НЧ-шума необходимо измерить, по крайней мере, два значения СПМ: $G_1(f_1)$ и $G_2(f_2)$ на двух различных частотах f_1 и f_2 ; при этом значение γ определяется по формуле [10]:

$$\gamma = \ln[G_1(f_1)/G_2(f_2)] / \ln(f_2/f_1). \quad (3)$$

Квадрат относительной погрешности измерения γ в общем случае будет определяться как погрешностями измерения СПМ, так и погрешностями задания средней частоты фильтра:

$$\delta_\gamma^2 = \varepsilon_G^2 + \delta_f^2, \quad (4)$$

где ε_G – суммарная погрешность, обусловленная погрешностью СПМ, δ_f^2 – суммарная погрешность, обусловленная погрешностью задания средних частот фильтров.

В большинстве практических случаев значение средней частоты современных фильтров в интегральном исполнении может быть задано с погрешностью в доли процента [4] и величиной δ_f^2 в (4) можно пренебречь. Тогда погрешность определения параметра γ будет определяться только погрешностью измерения СПМ.

Для оценки суммарной погрешности ε_G при измерении СПМ методом непосредственной оценки обычно используют значение предельной относительной методической погрешности измерения СПМ, которая определяется геометрическим суммированием (т. е., как корень из суммы квадратов) [4, 5]:

$$\varepsilon_G^2 = s^2 + \delta_G^2,$$

где относительная систематическая погрешность s (или ошибка смещения) СПМ может быть рассчитана по формуле:

$$s \approx \frac{\gamma(\gamma + 1)}{24} \cdot \left(\frac{\Delta f_{eff}}{f} \right)^2, \quad (5)$$

где f – частота, на которой производят измерения СПМ, Δf_{eff} – эффективная ширина полосы пропускания фильтра, а относительные среднеквадратические случайные погрешности δ_G^2 измерения СПМ при усреднении сигнала на выходе квадратичного детектора идеальным интегратором могут быть оценены выражением [11]:

$$\delta_G \approx \sqrt{\frac{1}{T \cdot \Delta f_{eff}}}, \quad (6)$$

где T – продолжительность интегрирования, то есть по существу – время измерения СПМ.

$$\delta_{\gamma\Sigma} = \frac{1}{\gamma_0 \cdot \ln(f_2/f_1)} \sqrt{\left(\ln \left[\frac{(1 + s_1 + \xi_1)}{(1 + s_2 + \xi_2)} \right] \right)^2 + \left(1 + \left(\frac{f_1}{f_0} \right)^{\gamma_0} \right)^2 \delta_{G1}^2 + \left(1 + \left(\frac{f_2}{f_0} \right)^{\gamma_0} \right)^2 \delta_{G2}^2}. \quad (8)$$

где $s_{1,2}$ – систематические погрешности (5) измерения СПМ (ошибки смещения) на соответствующей частоте, $\xi_{1,2} = G_0 / G_{НЧ1,2} = (f_{1,2} / f_0)^{\gamma_0}$ – параметры, характеризующие отношение составляющих СПМ белого шума и НЧ-шума в измеряемой шумовой смеси на заданных частотах, γ_0 – истинное значение показателя γ .

На рисунке 1 для иллюстрации приведен расчет суммарной погрешности определения γ по формуле (8) при последовательной фильтрации в зависимости от коэф-

Для снижения погрешности необходимо разнести частоты измерения на несколько октав, однако при этом должно выполняться условие постоянства параметра γ . Поскольку по определению $\ln(G_1 / G_2) = \gamma \cdot \ln(f_2 / f_1)$, то выражение (4) можно переписать в виде:

$$\delta_\gamma^2 = \frac{\varepsilon_{G1}^2 + \varepsilon_{G2}^2}{(\ln(G_1 / G_2))^2} = \frac{\varepsilon_{G1}^2 + \varepsilon_{G2}^2}{\gamma^2 \cdot (\ln(f_2 / f_1))^2}. \quad (7)$$

В [8] предложены измерительные процедуры, минимизирующие суммарную погрешность определения γ по результатам измерения СПМ на двух частотах при заданном полном времени T измерения. При последовательной фильтрации это достигается путем выбора оптимального коэффициента $k = T_1 / T$ распределения времени T_1 измерения СПМ на первой (нижней) и T_2 – на второй (верхней) частотах, а при параллельной фильтрации – путем выбора оптимальной частоты f_1 , при заданной частоте f_2 .

Результаты, полученные для случая последовательной фильтрации, показывают, что поскольку оптимальное время измерения СПМ на нижней частоте значительно больше, чем на верхней, то точность нахождения показателя γ определяется, главным образом, точностью измерения СПМ на нижней частоте. Добавление второго фильтра незначительно увеличит точность. При последовательной фильтрации для случая одинаковых относительных полос пропускания (ОПП) на обеих частотах в [8] рекомендуется выбирать $k_{opt} = 1 / (1 + \sqrt{f_1 / f_2})$.

В [4] нами было получено выражение для суммарной погрешности измерения показателя формы спектра с учетом белого шума с частотой перегиба f_0 спектра в виде геометрической суммы систематической и случайной погрешностей:

фициента k распределения полного времени измерения $T = 0,5$ с.

Из рисунка 1 видно, что уменьшение частоты перегиба приводит к увеличению погрешности определения γ и к смещению значения k_{opt} в сторону меньших значений.

В случае параллельной фильтрации шумового сигнала повышение точности измерения значения γ достигается выбором оптимального отношения частот

настройки фильтров. При параллельной фильтрации рекомендуется $a_{omn} \approx 9,19$, где $a = f_2/f_1$. На рисунке 2 показан график зависимости $\delta_{\gamma\Sigma}(a)$ с учетом белого шума.

Из графиков на рисунке 2 видно, что присутствие в реальном измеряемом шуме ИЭТ белого шума также приводит к значительному увеличению погрешности определения γ и к смещению a_{omn} в сторону больших значений.

Результаты приведенных оценок показывают, что присутствие белого шума значительно ослабляет эффект оптимизации при определении γ по результатам измерения СПМ на двух частотах. В связи с этим представляет теоретический и практический интерес анализ измерительных процедур при определении γ по результатам измерения СПМ на трех частотах.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ СПМ НА ТРЕХ ЧАСТОТАХ

Значение показателя γ по результатам измерения СПМ в трех точках спектра рассчитывается по формуле [11]:

$$\gamma = \log_a \frac{G_1 - G_{add}}{G_{add} - G_2}, \tag{9}$$

где G_1 , G_2 и G_{add} – СПМ шума на первой f_1 , второй f_2 и дополнительной f_{add} частоте соответственно; причем f_{add} выбирается из условия $f_{add} = \sqrt{f_1 f_2}$ и, соответственно, отношение соседних частот будет одинаковым: $a = f_{add}/f_1 = f_2/f_{add}$.

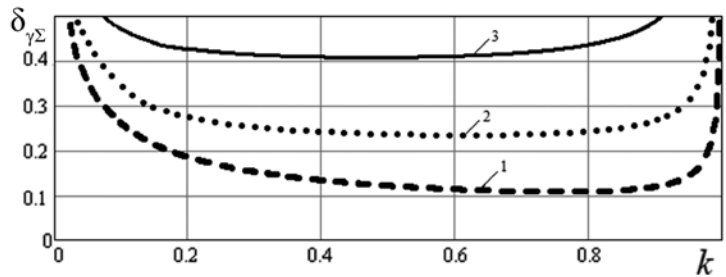


Рис. 1. Результаты расчета зависимости суммарной погрешности определения γ (для случая $\gamma_0 = 1,5$) от коэффициента k при последовательной фильтрации по результатам измерения СПМ на двух частотах $f_1 = 0,1$ кГц и $f_2 = 1$ кГц, при равных ОПП фильтров $(\Delta f_{eff1} / \Delta f_1) = (\Delta f_{eff2} / \Delta f_2) = 0,25$ и различных значениях частоты перегиба: 1 – 500 кГц; 2 – 1 кГц; 3 – 0,5 кГц

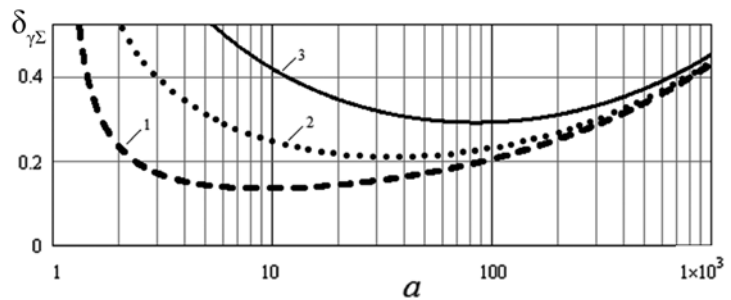


Рис. 2. Результаты расчета зависимости суммарной погрешности определения γ (для случая $\gamma_0 = 1,5$) от коэффициента a при параллельной фильтрации по результатам измерения СПМ на двух частотах при $f_2 = 1$ кГц, равных ОПП фильтров $(\Delta f_{eff1} / \Delta f_1) = (\Delta f_{eff2} / \Delta f_2) = 0,1$ и различных значениях частоты перегиба: 1 – 500 кГц; 2 – 1 кГц; 3 – 0,5 кГц

В [12] получено выражение для оценки случайной погрешности показателя формы спектра при его определении по результатам измерения СПМ на трех частотах с учетом наличия белого шума с частотой f_0 перегиба спектра шума:

$$\delta_\gamma = \frac{\sqrt{\left(\left(a^\gamma + \frac{b^\gamma}{(1+s_1)} \right) \cdot \delta_{G1} \right)^2 + \left(\left(1 + \frac{b^\gamma}{(1+s_{add})} \right) \cdot (1+a^\gamma) \cdot \delta_{Gadd} \right)^2 + \left(\left(1 + \frac{b^\gamma a^\gamma}{(1+s_2)} \right) \cdot \delta_{G2} \right)^2}}{\gamma(a^\gamma - 1) \ln(a)}, \tag{10}$$

где δ_{G1} , δ_{Gadd} и δ_{G2} – соответствующие среднеквадратические погрешности измерения СПМ, s_1 , s_2 , s_{add} – соответствующие погрешности смещения, $b = (f_{add}/f_0)$.

При равенстве ОПП фильтров относительные систематические погрешности измерения СПМ будут одинаковы на всех трех частотах, и влияние этих погрешностей будет взаимно скомпенсировано:

$$\gamma_{изм} = \log_a \frac{G_1 \cdot (1+s_1) - G_\delta \cdot (1+s_{add})}{G_\delta \cdot (1+s_{add}) - G_2 \cdot (1+s_2)} = \log_a \frac{G_1 - G_\delta + G_1 \cdot s_1 - G_\delta \cdot s_{add}}{G_\delta - G_2 + G_\delta \cdot s_{add} - G_2 \cdot s_2}. \tag{11}$$

Если влияние систематических погрешностей измерения СПМ скомпенсировано, случайную погрешность, определяемую выражением (10), можно принять за погрешность измерения. Поскольку s зависит от значения ширины полосы анализирующего фильтра, то для того, чтобы ошибка смещения была меньше, чем 0,1 в наихудшем случае

($\gamma=3$), достаточно выполнить условие $\Delta f_{eff}/f < 0,45$. А если ошибкой смещения можно пренебречь, то выражение (10) примет вид:

$$\delta_\gamma \approx \frac{\sqrt{\left((a^\gamma + b^\gamma) \cdot \delta_{G1}\right)^2 + \left((1 + b^\gamma) \cdot (1 + a^\gamma) \cdot \delta_{Gadd}\right)^2 + \left((1 + b^\gamma a^\gamma) \cdot \delta_{G2}\right)^2}}{\gamma(a^\gamma - 1)\ln(a)} \quad (12)$$

Заметим, что, если выбрать дополнительную частоту равной частоте перегиба $f_{add} = f_0$, то есть $b = 1$, то

$$\delta_\gamma \approx \frac{(a^\gamma + 1)\sqrt{\delta_{G1}^2 + 4\delta_{Gadd}^2 + \delta_{G2}^2}}{\gamma(a^\gamma - 1)\ln(a)}$$

ОПТИМАЛЬНАЯ ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЯ γ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

По аналогии с [8] общее время измерения $T_{общ}$, как основной модельный параметр, будем считать заданным. Введём обозначения $k_1 = T_1 / T_{общ}$ – доля времени первого измерения на частоте f_1 в общем времени и $k_2 = T_{дон} / (1 - k_1)T_{общ}$ – доля измерения на средней частоте в оставшемся времени. С учетом введенных обозначений и формулы (6) выражения для случайных погрешностей δ_{G1} , δ_{G2} , и δ_{Gadd} измерения СПМ шума на соответствующих частотах можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \delta_{G1}^2 &= \frac{a}{k_1 T_{общ} \Delta f_{омн} f_{add}}, \\ \delta_{G2}^2 &= \frac{1}{a(1 - k_2)(1 - k_1) T_{общ} \Delta f_{омн} f_{add}}, \\ \delta_{Gadd}^2 &= \frac{1}{k_2(1 - k_1) T_{общ} \Delta f_{омн} f_{add}}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\Delta f_{омн}$ – ОПП фильтров, которые полагаем одинаковыми для всех трех частот, что чаще всего и реализуется на практике при измерении СПМ с помощью селективных вольтметров.

Подставляя (13) в (10), получим выражение для погрешности определения γ в зависимости от отношений k_1 и k_2 длительностей измерения: $\delta_\gamma = \varphi(k_1, k_2)$. Приравнявая к нулю производные полученного выражения по k_1 и k_2 , получим систему уравнений для нахождения оптимальных значений k_1 и k_2 , минимизирующих погрешность определения γ . Опуская громоздкие преобразования, из решения системы в предположении $(1 + s) \approx 1$ и $a \gg 1$ получим:

$$\begin{cases} \frac{1}{k_1} = 1 + \frac{1}{a^\gamma + b^\gamma} \sqrt{(1 + b^\gamma)^2 \frac{a^{2\gamma}}{a} \left(\frac{1 + b^\gamma a^\gamma}{(1 + b^\gamma) \cdot a^\gamma \sqrt{a}} + 1 \right) + (1 + b^\gamma a^\gamma)^2 \frac{1}{a^2} \left(1 + \frac{(1 + b^\gamma) \cdot a^\gamma \cdot \sqrt{a}}{(1 + b^\gamma a^\gamma)} \right)}, \\ \frac{1}{k_2} = \frac{1 + b^\gamma a^\gamma}{(1 + b^\gamma) \cdot a^\gamma \cdot \sqrt{a}} + 1. \end{cases} \quad (14)$$

Эти выражения определяют оптимальные доли времени для измерения на нижней и на средней частоте при заданном общем времени измерения.

Оптимальное решение можно отыскать и расчетным путем с помощью компьютера. На рисунке 3 в качестве иллюстрации приведена поверхность, описываемая функцией $\delta_\gamma = \varphi(k_1, k_2)$ в координатах k_1 и k_2 , при $a = 10$, $b = 1$, $\gamma = 1,5$, $f_0 = 1000$ Гц, $s = 0,05$.

Из рисунка 3 видно, что на поверхности погрешности есть точка минимума с координатами $(k_{1онм}, k_{2онм})$. Согласно компьютерному расчету: $k_{1онм} = 0,5834929$, $k_{2онм} = 0,86618$; а по аналитическим выражениям $k_{1онм} = 0,5834908$, $k_{2онм} = 0,86618$. Для приведенных выше параметрах снижение погрешности при оптимальном распределении времени измерения составляет 3,4% от значения γ по сравнению с погрешностью, получаемой при равномерном распределении полного времени измерения между измерениями на разных частотах.

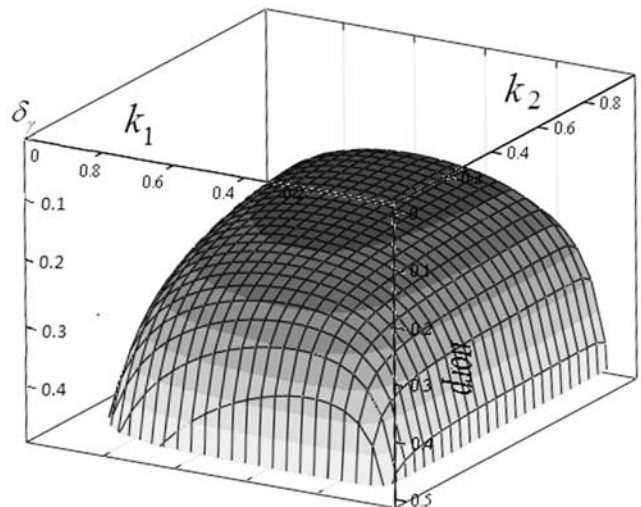


Рис. 3. График функции $\delta_\gamma = \varphi(k_1, k_2)$ в координатах коэффициентов распределения времени

Для оценки частоты перегиба необходимо по формуле (9) найти измеренное значение показателя спектра $\gamma_{изм}$, а затем частоту перегиба спектра шума рассчитать по формуле:

$$f_0 = a^{\gamma_{изм}} f_1^{\gamma_{изм}} \sqrt{\frac{G_2 - G_1}{G_1 - a^{2\gamma_{изм}} G_2}}$$

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ШУМА ТРЕМЯ ФИЛЬТРАМИ

Предполагается, что полное время измерения (продолжительность усреднения) задано, а ОПП фильтров одинаковы. Для установки начальных параметров процедуры измерения необходимы априорные значения показателя спектра и частоты перегиба. Например, в случае полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом показатель формы спектра лежит в диапазоне $1 < \gamma < 1,5$. Частота перегиба может варьироваться от 100 Гц до нескольких кГц. В качестве априорного значения частоты перегиба можно принять среднее арифметическое. Из графиков на рисунке 4, постро-

енных по формуле (10) при $\gamma = 1,0$, $s = 0,1$, значениях δ_{G1} , δ_{G0} , и δ_{G2} , вычисленных при частоте перегиба 1000 Гц, ОПП фильтров – 0,25, продолжительности усреднения – 1 с, можно видеть, что существует оптимальное значение *a*.

Очевидно, что при заданном *a* существует оптимальное отношение дополнительной частоты и частоты перегиба (рис. 5).

Возрастание погрешности при уменьшении отношения частот связано с увеличением погрешностей измерения СПМ (при том же времени усреднения). Если погрешность измерения СПМ остаётся постоянной, погрешность определения γ при уменьшении отношения частот будет только снижаться. Если продифференцировать выражение (10) по *a* и *b* и приравнять производные нулю, получим систему из двух уравнений для нахождения оптимальных значений b_{opt} и a_{opt} . Аналитические выражения для производных слишком громоздки для функционального анализа. Поскольку оптимальные значения b_{opt} и a_{opt} зависят только от значения γ , а диапазон возможных значений γ известен, то для практических приложений достаточно определить оптимальные параметры измерения для ограниченного ряда значений γ и составить таблицу (табл. 1).

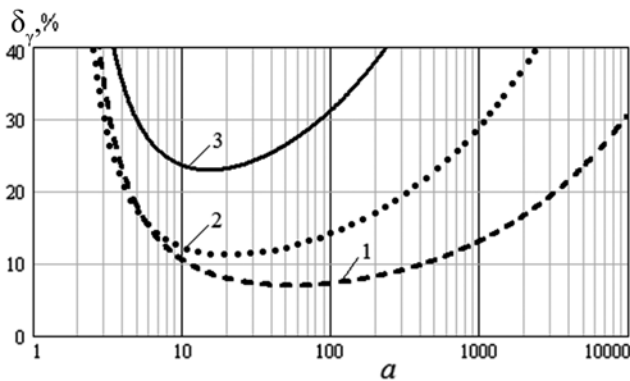


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности от значения коэффициента *a* при различных значениях отношений *b*: 1 – *b* = 5; 2 – *b* = 1; 3 – *b* = 0,2

Таблица 1

Оптимальные значения параметров *a* и *b* при измерении по трем частотам при параллельной фильтрации

γ	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
a_{opt}	1483	147	40	23	19	17
b_{opt}	235	12,6	2,7	1,6	1,3	1,2

Графическое решение задачи определения оптимальных параметров b_{opt} и a_{opt} показано на рисунке 6, где график функции $\delta_\gamma = \varphi(a, b)$ построен в логарифмическом масштабе аргументов $lg(a)$ и $lg(b)$.

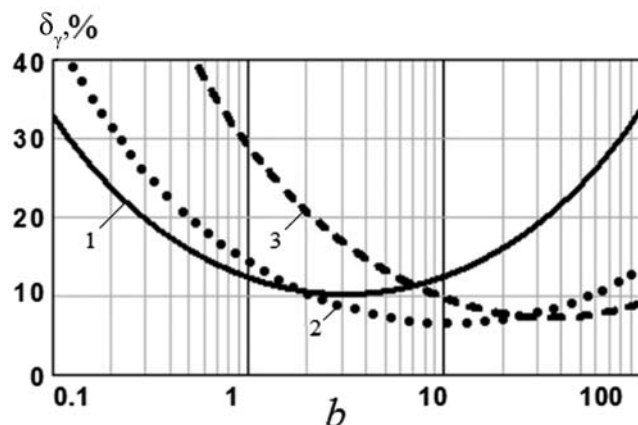


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности от отношения $b = (f_{add}/f_0)$ при различных значениях отношения *a*: 1 – *a* = 10; 2 – *a* = 100; 3 – *a* = 1000

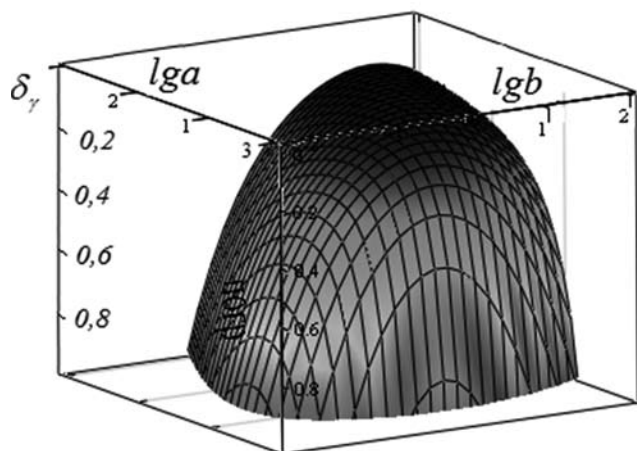


Рис. 6. График функции $\delta_\gamma = \varphi(a, b)$ в логарифмическом масштабе аргументов $lg(a)$ и $lg(b)$

рифмическом масштабе для случая: $\gamma = 1,0$; $s = 0,05$; и значений δ_{G1} , δ_{Gadd} , δ_{G2} , вычисленных при частоте перегиба – 1000 Гц, ОПП фильтра – 0,2, времени усреднения – 0,5 с.

Из графика на рисунке 6 видно, что функция имеет ярко выраженный минимум. Для приведенных параметров измерения минимум погрешности достигается при $lg(a_{opt}) = 2,17$, $lg(b_{opt}) = 1,10$. При отклонении значений параметров от оптимальных погрешность определения γ сильно возрастает.

При реализации описанных выше процедур следует учитывать, что априори значение γ неизвестно и оптимальные параметры измерения обычно выбираются из предположения, что $\gamma = 1$. Поскольку реальное значение γ может существенно отличаться от 1, то и суммарная погрешность измерения γ будет не минимальной, а, по предварительным оценкам, в 1,5–2 раза выше. Минимизировать эту погрешность можно либо повторным измерением при оптимальных параметрах измерения, соответствующих полученной оценке значения γ , что потребует дополнительного времени для настройки измерительной системы, либо путем применения адаптивных алгоритмов [13]. Разработка таких алгоритмов для рассмотренных измерительных процедур представляет отдельную задачу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в статье краткий анализ показывает, что присутствие в измеряемом шуме ИЭТ белого шума приводит к значительному увеличению погрешности оценки показателя γ спектра шума по результатам измерения СПМ на двух частотах. Это приводит к значительному ослаблению эффекта оптимизации параметров измерения, предложенной нами в [8], и обуславливает актуальность анализа измерительных процедур определения значения γ по результатам измерений на трех частотах.

При последовательной фильтрации получены выражения для оптимальных коэффициентов распределения заданного полного времени измерения между измерениями на первой, второй и дополнительной частотах, при которых погрешность определения значения γ минимальна. Правильность аналитических выражений подтверждена результатами численного моделирования.

При параллельной фильтрации минимизация погрешности определения значения γ достигается путем выбора оптимального отношения частот измерения СПМ шума при заданном полном времени измерения. Ввиду громоздкости аналитических выражений расчет оптимальных значений b и a для ряда значений γ проведен численным способом.

Предложенные оптимальные процедуры и для последовательной фильтрации, и для параллельной

фильтрации могут быть легко реализованы в измерительной системе на основе микроконтроллера общего применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жигальский Г.П. Неразрушающий контроль качества интегральных микросхем по электрическим шумам и параметрам нелинейности // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 5. – С. 517–551.
2. Горлов М.И., Сергеев В.А. Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 406 с.
3. Низкочастотный шум в исходных и деградировавших синих InGaAs/GaN-светодиодах / А.Л. Закгейм, М.Е. Левинштейн, В.П. Петров [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Вып. 2. – С. 219–223.
4. Сергеев В.А., Резчиков С.Е. Методическая погрешность измерения показателя степени частотной зависимости спектра низкочастотного шума // Измерительная техника. – 2015. – № 10. – С. 55–59.
5. Sergeev V.A., Rezhnikov S.E. The Systematic Error of Measurement of the Exponent of the Frequency Dependence of the Spectrum of Low-Frequency Noise // Measurement Techniques. – 2016. – V. 58, № 10. – pp. 1160–1166.
6. Резчиков С.Е., Сергеев В.А. Оценка погрешности определения показателя степени в спектре НЧ-шума // Радиоэлектронная техника. – 2015. – № 1. – С. 94–98.
7. Мирский Г.Я. Электронные измерения. – М.: Радио и связь, 1986. – 439 с.
8. Сергеев В.А., Резчиков С.Е. Оптимизация процедур измерения параметров низкочастотного шума со спектром вида $1/f^\gamma$ // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 4 (46). – С. 101–107.
9. Устройство для измерения параметра низкочастотного шума γ : пат. №2475767 РФ / Горлов М.И. и др. – опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.
10. Резчиков С.Е. Обзор методов измерения показателя спектра НЧ-шума // Радиоэлектронная техника : межвуз. сб. науч. тр. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – № 2. – С. 88–93.
11. Резчиков С.Е. Оценка погрешности определения показателя спектра НЧ-шума // 19-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: сб. матер. форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2015. – Т. 2. – С. 164–165.
12. Reschikoff S. Basic relations for construction of adaptive system for low-frequency noise measurement of semiconductor devices // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series: Radio Physics and Electronics. – 2015. – № 1. – pp. 71–73.
13. Резчиков С.Е., Сергеев В.А. Адаптивный алгоритм измерения спектральной плотности мощности низкочастотного шума полупроводниковых приборов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2013. – Т. 13, № 3. – С. 168–169.

REFERENCES

1. Zhigalskii G.P. Nerazrushaiushchii kontrol kachestva integralnykh mikroskhem po elektricheskim shumam i parametram nelineinosti [Nondestructive Quality Control of Integrated Circuits by Electrical Noise and Nonlinearity Characteristics]. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2005, vol. 50, no. 5, pp. 517–551.
2. Gorlov M.I., Sergeev V.A. *Sovremennye diagnosticheskie metody kontrolya kachestva i nadezhnosti poluprovodnikovyykh izdelii* [Modern Diagnostic Techniques of Semiconductor Devices Quality and Reliability Control]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2015. 406 p.
3. Zakheim A.L., Levinshtein M.E., Petrov V.P., et al. Nizkochastotnyi shum v iskhodnykh i degradirovavshikh sinikh InGaAs/GaN-svetodiodakh [Low Frequency Noise in Native and Degraded Blue InGaN/GaN LEDs]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductor Physics and Engineering], 2012, iss. 2, pp. 219–223.
4. Sergeev V.A., Rezhnikov S.E. Metodicheskaya pogreshnost izmereniya pokazatelya stepeni chastotnoi zavisimosti spektra nizkochastotnogo shuma [The Systematic Error of Measurement of the Exponent of the Frequency Dependence of the Spectrum of Low-Frequency Noise]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2015, no. 10, pp. 55–59.
5. Sergeev V.A., Rezhnikov S.E. The Systematic Error of Measurement of the Exponent of the Frequency Dependence of the Spectrum of Low-Frequency Noise. *Measurement Techniques*, 2016, vol. 58, no. 10, pp. 1160–1166.
6. Rezhnikov S.E., Sergeev V.A. Otsenka pogreshnosti opredeleniya pokazatelya stepeni v spektre NCh-shuma [The Error Estimation of the Exponent Determination of the Spectrum of Low-Frequency Noise]. *Radioelektronnaia tekhnika* [Radioelectronics], 2015, no. 1, pp. 94–98.
7. Mirskii G.Ia. *Elektronnye izmereniya* [Electronic Measurements]. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1986. 439 p.
8. Sergeev V.A., Rezhnikov S.E. Optimizatsiya protsedur izmereniya parametrov nizkochastotnogo shuma so spektrom vida $1/f^\gamma$ [Optimization of the Procedures of Measuring the Parameters of Low-Frequency Noise With $1/f^\gamma$ -type Spectrum]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2016, no. 4 (46), pp. 101–107.
9. Gorlov M.I. et al. *Ustroystvo dlya izmereniya parametra nizkochastotnogo shuma γ* [Device for Measuring the Parameters of Low-Frequency Noise of γ -Type]. Patent RF no. 2475767 RF. Date of publication: February 20, 2013, Bull. no. 5.
10. Rezhnikov S.E. Obzor metodov izmereniya pokazatelya spektra NCh-shuma [Measurement Technique Review of Exponents of the Spectrum of Low-Frequency Noise]. *Radioelektronnaia tekhnika. Mezhevuz. sb. nauch. tr.* [Radioelectronics. Interuniversity Proc.]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2015, no. 2, pp. 88–93.
11. Rezhnikov S.E. Otsenka pogreshnosti opredeleniya pokazatelya spektra NCh-shuma [The Error Estimation of the Exponent Determination of the Spectrum of Low-Frequency Noise]. *19-i Mezhdunarodnyi molodezhnyi forum "Radioelektronika i molodezh v XXI veke". Sb. mater. foruma* [Proc. of the 19th Int. Youth Forum "Radioelectronics and Young People in the 21st Century"]. Kharkov, KhNURE Publ., 2015, vol. 2, pp. 164–165.
12. Rezhnikov S.E. Basic Relations for Construction of Adaptive System for Low-Frequency Noise Measurement of Semiconductor Devices. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kiev. Radio Physics and Electronics Series*, 2015, no. 1, pp. 71–73.
13. Rezhnikov S.E., Sergeev V.A. Adaptivnyi algoritm izmereniya spektralnoi plotnosti moshchnosti nizkochastotnogo shuma poluprovodnikovyykh priborov [An Adaptive Algorithm for Measurement of the Spectral Power Density of Low-Frequency Noise of Semiconductor Devices]. *Fundamentalnye problemy radioelektronnogo priborostroeniya* [Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction], 2013, vol. 13, no. 3, pp. 168–169.