

В. Ю. Холкин

МОДЕЛЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ $1/f$ -ШУМА КАК РЕЗУЛЬТАТ ПУАССОНОВСКОГО ПРОЦЕССА

Возникновение $1/f$ -шума интерпретируется как результат эволюции пуассоновского процесса. Сопоставляются представления спектральной плотности пуассоновского процесса и эквивалентного ему $1/f$ -шума.

Ключевые слова: $1/f$ -шум, $1/f$ -зависимость, низкочастотный шум.

Изучение случайных сигналов с распределением спектральной плотности мощности, обратно пропорциональной частоте (так называемого $1/f$ -шума), было инициировано развитием теории твердотельных полупроводниковых устройств. Несмотря на то что $1/f$ -шум, как показано экспериментально, можно наблюдать в различных системах (что обуславливает неоднозначность его названия: фликкер-шум, токовый, контактный, избыточный и т.д.), до настоящего времени нет единого мнения о природе этого явления. Как следствие, это не позволяет построить адекватную математическую модель, необходимую, в частности, для поверочных расчетов и оценки характеристик собственных шумов полупроводниковых приборов на этапе их проектирования.

Предлагаемая в статье [1] барьерная модель возникновения $1/f$ -шума хорошо согласуется с экспериментальными данными [2] и объясняет возникновение $1/f$ -участков наличием потенциальных барьеров. Однако эта модель является достаточно грубой в силу того, что она объясняет лишь асимптотическое поведение функции спектральной плотности такого процесса [3]. В настоящей статье рассматривается детализированная модель, которая определяет спектральную плотность зависимостью $1/f^y$, где пределы степени y изменяются от 0,8 до 1,2.

В качестве механизма генерации $1/f$ -шума в рамках данной модели используется пуассоновский процесс, который описывается случайной последовательностью точек $\{t_k\}$ вдоль временной оси

$$N(t) = \sum \omega(t - t_k); \quad 0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots, \quad (1)$$

где $\omega(t)$ — единичная функция включения $\omega(t) = (1 + \text{sign} t) / 2$. Таким образом, случайное значение $N(t)$ отражает число точек включения между 0 и t . Спектральная плотность такого процесса задается выражением [4]

$$K_{xx}(f) = \frac{2\lambda P(1-P)}{(2\pi f)^2 + \lambda^2} + P^2 \delta(f), \quad (2)$$

где $P^2 \delta(f)$ — постоянная составляющая при $f = 0$; P — вероятность появления события (включений или появления импульса) в единичный интервал времени. Величина P соответствует коэффициенту заполнения процесса, т.е. отношению средней длительности импульса к среднему периоду процесса. Величина λ характеризует среднюю частоту (интенсивность) процесса, а f — текущую частоту.

Уравнение (2) является обобщением выражения c/f^y на весь диапазон частот. При достаточно большом значении λ кривая спектральной плотности не может быть выражена в форме $1/f$. Напротив, при малой частоте (интенсивности) процесса $\lambda \ll f$ для сверхнизких частот спектральная плотность начинает вести себя как c/f^y .

В результате проведенных исследований пределов изменчивости параметров модели (1)—(2) получено, что для модели приближения $1/f^2$ -шума пуассоновским процессом существует нижняя граница параметра $y=0,8$ в эмпирической формуле c/f^y . Аналогично определена верхняя граница параметра $y=1,5$. Обе оценки подтверждаются экспериментальными данными [3].

Таким образом, $1/f$ -шум в ряде случаев может интерпретироваться как результат эволюции некоторого пуассоновского процесса, в явном виде не выделяемого в системе. Это ограничивает применение эмпирической формулы c/f^y для спектральной плотности диапазоном сверхнизких частот, что связано с введением пределов изменения величины y .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холкин В. Ю. Модель барьерного механизма возникновения $1/f^2$ -шума в полупроводниковых устройствах // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 1. С. 54—57.
2. Beutler F. J., Leneman O. A. Z. The spectral analysis of impulse processes // Information and Control. 1968. Vol. 12. P. 236—258.
3. Кешнер М. С. Шум типа $1/f$ // Академия Тринитаризма. Эл № 77—6567. Публ. 10993, 10.02.2004.
4. Френкс Л. Теория сигналов / Пер. с англ; под ред. Д. Е. Вакман. М.: Сов. радио, 1974.

Сведения об авторе

Владимир Юрьевич Холкин

— канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный государственный заочный технический университет, кафедра технологии и дизайна радиоэлектронной техники, Санкт-Петербург; E-mail: vkholkin@mail.ru

Рекомендована институтом

Поступила в редакцию
10.03.09 г.