

УДК 538.95

ТОКОВЫЕ ШУМЫ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

Кобяков В.Е., студент гр. ИУК1-42Б, 2 курс

Научный руководитель: Никифоров Д.К., к.ф.-м.н., доцент
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Калужский филиал
г.Калуга

Аннотация. Изучен $1/f$ шум в электронных системах. Описаны различные типы шумов, их происхождение и применение в различных областях науки и техники.

Ключевые слова: токовые шумы, розовый шум, белый шум, шум Джонсона-Найквиста, проводники, полупроводники.

Токовые шумы являются важным инструментом диагностики в электронных системах и устройствах. Изучение этих шумов имеет фундаментальное значение не только для понимания физических процессов в материалах и устройствах, но и для разработки эффективных методов снижения шума и повышения производительности систем.

Токовые шумы представляют собой случайные флуктуации электрического тока, которые могут возникать из-за различных причин, таких как тепловые флуктуации, флуктуации концентрации носителей заряда и технические неидеальности устройств. Среди основных типов токовых шумов можно выделить тепловой шум, генерируемый движением носителей заряда при ненулевой температуре, шум Джонсона-Найквиста, а также шум, связанный с различными механизмами переноса заряда в полупроводниковых устройствах.

С применением теоремы Найквиста о флуктуациях и диссипации можно исследовать шумы в сложной электрохимической системе, где замедленный разряд сопровождается адсорбцией вещества на поверхности. Подтверждается, что дисперсии тепловых флуктуаций подчиняются уравнению, общему для подходов Гиббса и Эйнштейна-Ландау к теории флуктуаций тепла для экстенсивных величин, а также для шумового подхода, основанного на теореме Найквиста о флуктуациях и диссипации.

Линейный отклик имеет существенное значение в современной теории равновесных шумов и флуктуаций в нелинейных системах. Это объясняется тем, что согласно флуктуационно-диссипационной теореме Найквиста, существует связь между функцией линейной зависимости от тока через цепь $N^{(i)}(t)$ и корреляционной функцией $K^{(i)}(t)$ существует линейная зависимость между шумовым током $i(t)$ в момент времени t и его автокорреляционной функцией $K^{(i)}(t) = \langle i(0)i(t) \rangle : K^{(i)}(t) = kT N^{(i)}(t)(1)$, где t – время, k – постоян-

ная Больцмана, T – температура, а скобки $\langle \dots \rangle$ операция усреднения по ансамблю реализаций представлена в данном контексте случайного процесса.

В операционном методе вместо можно записать:

$K^{(i)}(p) = kTG(p)$, где образ Лапласа корреляции расположен слева от данной функции, а справа – слабосигнальный (линейный) операционный адмитанс $G(p)$ нелинейной электрической цепи, в которой протекает флуктуационный ток $i(t)$:

$$K^{(i)}(p) = \int_0^{\infty} dt \exp(-pt) K^{(i)}(t)$$

$$G(p) = \int_0^{\infty} dt \exp(-pt) H^{(i)}(t)$$

В данном случае p – это переменная Лапласа. Заметим, что Фурье представление флуктуационно-диссипационной теоремы Найквиста получается простой заменой $p = j\omega$, где j – мнимая единица, а ω – круговая частота анализа.

Для определения масштаба тепловых колебаний для достижения полного и свободного заряда электрода можно использовать любое представление флуктуационно-диссипационного процесса теоремы Найквиста. Однако наиболее простой для достижения успеха необходимо воспользоваться операционным представлением.

Говоря о шумах, необходимо упомянуть шум вида $1/f$, или так называемый "розовый шум". Он представляет собой тип шума, который отличается тем, что амплитуда спектральной плотности обратно пропорциональна частоте.

Шум с показателем $1/f$ отличается спектральной плотностью мощности $S(f)$, которая его характеризует и убывает с увеличением частоты. С математической точки зрения, спектральная плотность мощности низкочастотного шума $1/f$ можно описать следующим уравнением: $S(f) = \frac{k}{f^\alpha}$, где k – коэффициент, определяющий необходимую величину амплитуды. и убывает мощность по закону $\frac{1}{f^\alpha}$, f представляет собой частоту, а α – это экспоненциальное значение, которое обычно находится в интервале от 0 до 2. Данное уравнение демонстрирует, что спектральная плотность мощности розового шума уменьшается в обратной пропорции квадрату частоты. Ещё одной значимой формулой, связанной с розовым шумом, является формула вычисления мощности шума P в определённом диапазоне частот:

$P = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S(f) df$, где f_{\max} , f_{\min} – в пределах данного диапазона рассматриваются как наивысшая, так и наименьшая частоты.

Данный вид шума обладает особыми свойствами, которые делают его отличным от белого шума (с постоянной спектральной плотностью мощности) и других типов шума.

Шум наблюдается в следующих областях:

1) В области электроники и связи, низкочастотные шумы типа $1/f$ могут наблюдаться в различных электронных компонентах, включая полупроводники, транзисторы и операционные усилители. Это является ключевым фактором, влияющим на точность и стабильность работы электронных устройств.

2) Физика и астрономия: Розовый шум обнаруживается в разнообразных физических системах, включая квантовые точки и ядерные реакторы. В астрономии он может проявиться при изучении космических сигналов.

3) Розовый шум применяется в нейрофизиологии для исследования активности мозга, а также в медицинской диагностике для анализа биологических сигналов.

Низкочастотные шумы вида $1/f$ будут шумы являются значимым явлением в различных областях науки и техники. Их характеристики и свойства привлекают внимание и стимулируют активное изучение и применение в разнообразных областях, от электроники до медицины. Понимание этого вида шума и его математическое описание играют важную роль в разработке методов анализа и управления для повышения эффективности и точности различных систем.

Изучение шумов тока и шума $1/f$ является активным направлением исследований в современной науке и технике. Для анализа этих шумов применяются различные методы, такие как спектральный и корреляционный анализ, статистическая обработка данных и моделирование физических процессов. С использованием этих методов исследователи стремятся к более глубокому пониманию природы токовых шумов и разработке эффективных способов их снижения.

Рассмотрим далее так называемые звуки белого шума. Белый шум - это случайный сигнал, в котором каждая частота имеет одинаковую силу на каждом уровне частоты. Это означает, что амплитуда сигнала равномерно распределена по всем частотам спектра. В отличие от других типов шума, таких как розовый или броуновский, где энергия уменьшается с увеличением частоты, в белом шуме энергия на каждой частоте одинакова.

В проводниках и полупроводниках возможно возникновение белого шума из-за различных причин, таких как движение носителей заряда под воздействием тепла, изменения концентрации носителей заряда и другие. Этот вид шума играет важную роль при разработке и анализе электронных устройств, включая усилители, фильтры, датчики и другие устройства.

Можно выразить среднеквадратичное напряжение шума через его спектральную плотность мощности (PSD - Power Spectral Density).

$V_{\text{шум RMS}} = \sqrt{\int_0^{\infty} S(f) df}$, где $S(f)$ - спектральная плотность мощности вычисляется с помощью данного уравнения. $S = \frac{N_0}{2}$, где N_0 - плотность мощности шума.

Для расчёта шумов в полупроводниках используют формулу Шотки: $I_n = \sqrt{2qI\Delta f}$, где I_n - ток шума, q - элементарный заряд, I - средний ток, а Δf - ширина полосы частот.

С помощью формулы Найквиста можно получить описание теплового шума в проводниках: $V = \sqrt{4kTR\Delta f}$, где k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, R - сопротивление проводника, Δf - ширина полосы частот.

Белый шум играет значительную роль в электронике и электротехнике. Он присутствует в различных устройствах и может существенно влиять на их работу. Понимание основных формул, описывающих белый шум в проводниках и полупроводниках, позволяет инженерам и научным работникам более эффективно проектировать и анализировать электронные устройства с учетом этого явления.

Исследование токовых шумов, является ключевым аспектом разработки электронных систем. Математическое моделирование и анализ спектральных характеристик шумов играют важную роль в повышении эффективности систем и разработке методов управления. Понимание природы и происхождения шумов существенно для создания более надежных и производительных устройств в различных областях применения, от электроники до медицины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колмогоров А.Н., С.В. Фомин. Элементы теории функций функционального анализа. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М., «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1968. – 496 с.
2. Жигальский Г.П. Шум вида $1/f$ и нелинейные эффекты в тонких металлических пленках// Успехи физических наук. 1997. Т. 167. No 6. С. 623.
3. Steinbach A.H., Martinis J.M. Observation of Hot-Electron Shot Noise in a Metallic Resistor// Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. Iss.20. P. 3806.
4. Тарасов М.А., Кузьмин Л.С., Фоминский М.Ю. и др. Токовый шум в мезоскопических проводниках при низких температурах. Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 1. С. 99-103.
5. Сажина О.С., Булыгин И.И., Черепашук А.М. Исследование спектральных характеристик и статических свойств фликкер-шума. Астрономический журнал. 2021. Т. 98. № 9. С. 754-779.
6. Мацаев А.С. Физика фликкер-шума и модификация модели транзистора. Журнал радиоэлектроники. 2020. № 7. С. 6.