

Методы измерения физических величин

Фундаментальные шумы в измерительных
устройствах.

Шум

- › **Шум** — беспорядочные колебания различной физической природы, отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры. Первоначально слово *шум* относилось исключительно к звуковым колебаниям, однако в современной науке оно было распространено и на другие виды колебаний (радио-, электричество).
- › На клеммах электронных устройств и систем наблюдаются случайные флуктуации напряжения (или тока), и эти флуктуации обычно называют *электронным шумом*. Этот шум не обусловлен, например, дефектом контактов или каким-либо другим устранимым паразитарным эффектом, а присущ самой системе.

Типы шума

Электрические шумы в инженерном понимании можно разделить на две группы:

- › естественные или фундаментальные, которые порождаются физическими процессами и описываются законами статистической физики; они принципиально неустранимы. Их еще можно назвать внутренними шумами, поскольку они зарождаются внутри электрических и даже неэлектрических элементов приборов;
- › искусственные, которые порождаются созданными человеком устройствами и потому устранимы; их и называют собственно помехами.

Фундаментальные электрические шумы

Радиоэлектронные шумы можно разделить на несколько типов:

- › Тепловые шумы;
- › Дробовые шумы;
- › Контактные шумы;
- › Импульсные шумы.

Тепловой шум

Обнаружен в 1928 году Джоном Джонсоном.

В том же 1928 году Гарри Найквист, с помощью положений термодинамики, смог описать полученные результаты.

Тепловые шумы

- › **Тепловой шум** - равновесный шум, обусловленный тепловым движением носителей заряда в проводнике, в результате чего на концах проводника возникает флуктуирующая разность потенциалов. Тепловой шум возникает в любом проводнике электрического тока и связан с хаотичным движением подвижных носителей заряда, в результате которого на контактах образца появляются флуктуации напряжения.

Формула Найквиста

Средний квадрат напряжения теплового шума зависит только от активного сопротивления проводника R и абсолютной температуры проводника T и может быть рассчитан по формуле *Найквиста*:

$$\overline{e_t^2} = \frac{4kT}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \operatorname{Re}[Z(j\omega)] d\omega \Big|_{Z=R} = 4kTR\Delta f$$

где k – постоянная Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – абсолютная температура; B – полоса пропускания шумов, Гц; R – сопротивление, Ом.

Свойства теплового шума

$$S_f = 4kTR \frac{hf}{kT} \left(\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1 \right)^{-1} \quad \text{- спектральная мощность}$$

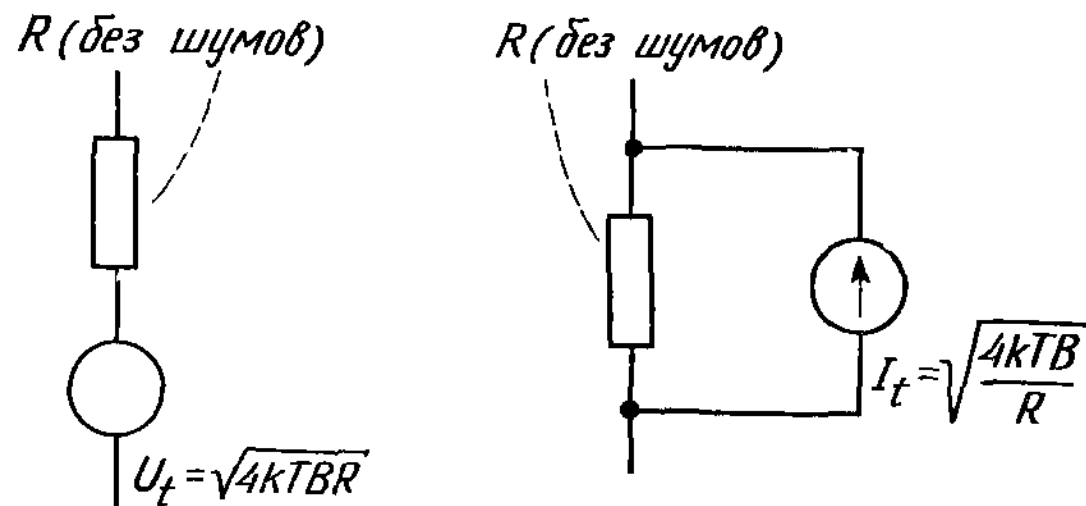
При $hf/kT \ll 1$, спектральную мощность можно считать постоянной и не зависящей от частоты. Тогда

$$S_f = \frac{\overline{e_t^2}}{\Delta f} = 4kTR \quad \text{при комнатной температуре}$$

$f_{кр} = kT/h \approx 6 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$

Поэтому тепловой шум можно рассматривать в широком диапазоне частот как белый шум.

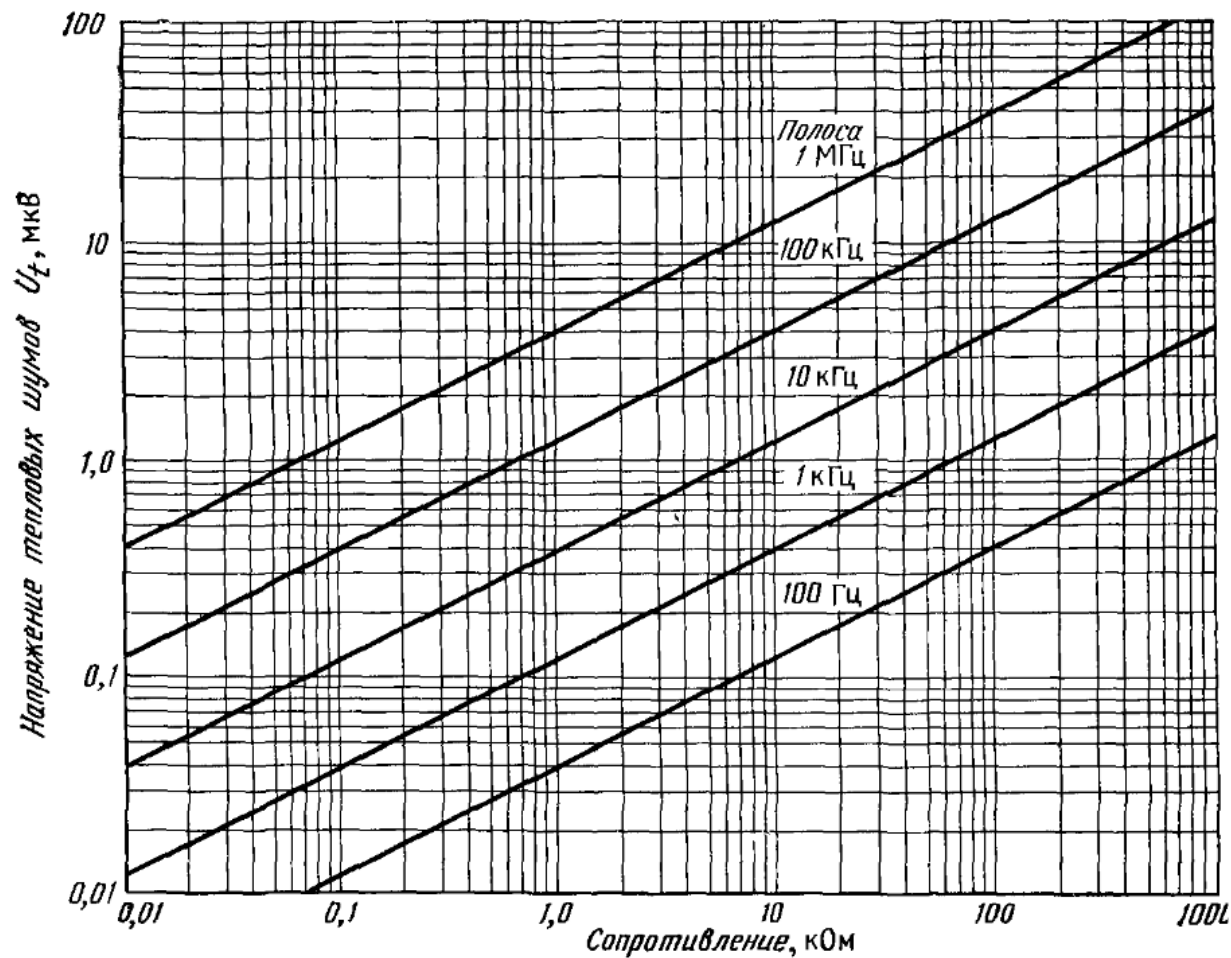
Эквивалентная схема теплового шума



Представление тепловых шумов на эквивалентной схеме в виде источников напряжения и тока.

Эквивалентное напряжение на $R=50$ Ом, при $T=300$ К и полосе пропускания 1 ГГц $U_t = 2.7$ мкВ

Напряжение тепловых шумов



Графики зависимости тепловых шумов от полосы пропускания и сопротивления при 17°C

Мощность теплового шума

Мощность рассеиваемая на резисторе

$$P = \frac{\overline{e_t^2}}{R} = 4kT\Delta f$$

Максимальная мощность выдаваемая в наружную схему при равенстве шумового сопротивления и сопротивления цепи:

$$P = kT\Delta f$$

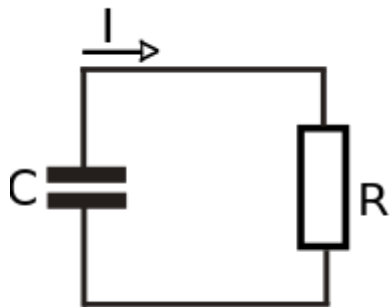
Мощность сигнала часто измеряют в dBm (децибеллы на милливатт)

$$P_{dBm} = 10\log_{10}(kT\Delta f \times 10^3) = 10\log_{10}(kT \times 10^3) + 10\log_{10}(\Delta f) = -174 + 10\log_{10}(\Delta f)$$

Типичные значения мощности шума

Bandwidth (Δf)	Thermal noise power	Notes
1 Hz	-174 dBm	Deep space noise is considered -198dBm/Hz
10 kHz	-134 dBm	FM channel of 2-way radio
200 kHz	-121 dBm	GSM channel, One LTE resource block
1 MHz	-114 dBm	Bluetooth channel
2 MHz	-111 dBm	Commercial GPS channel
3.84 MHz	-108 dBm	UMTS channel
6 MHz	-106 dBm	Analog television channel
20 MHz	-101 dBm	WLAN 802.11 channel
40 MHz	-98 dBm	WLAN 802.11n 40 MHz channel
80 MHz	-95 dBm	WLAN 802.11ac 80 MHz channel
160 MHz	-92 dBm	WLAN 802.11ac 160 MHz channel
1 GHz	-84 dBm	UWB channel

Тепловой шум конденсаторов



Полоса пропускания для типичной RC-цепочки

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{1 + (\omega RC)^2} = \frac{1}{2\pi} \frac{\pi}{2RC} = \frac{1}{4RC}$$

$$\overline{e_t^2} = 4kTR\Delta f = \frac{kT}{C} \quad \text{не зависит от сопротивления!}$$

Емкостной шум

Типичная величина емкостного шума при 300 К

Емкость	Эффективное напряжение	Эффективный заряд
1 fF	2 mV	12.5 e ⁻
10 fF	640 μ V	40 e ⁻
100 fF	200 μ V	125 e ⁻
1 pF	64 μ V	400 e ⁻
10 pF	20 μ V	1250 e ⁻
100 pF	6.4 μ V	4000 e ⁻
1 nF	2 μ V	12500 e ⁻

Дробовой шум

- › **Дробовой шум (shot noise)** – беспорядочные флуктуации напряжений и токов относительно их среднего значения в цепях электрических и электронных устройств, обусловленные дискретностью носителей электрического заряда — электронов, ионов.
- › Перемещение каждого носителя заряда в цепи (например, электрона) сопровождается всплеском тока в цепи.
- › Формула Шоттки для эффективного значения дробового тока:
$$I_s^2 = 2e I_0 \Delta \nu$$
, где e – заряд электрона, $\Delta \nu$ – полоса пропускания.

Дробовой шум

- › В отличие от теплового шума, вызванного тепловым движением электронов, дробовой шум не зависит от температуры.
- › Дробовой шум проявляется, например, в виде характерного акустического шума в динамике радиоприемника, в виде «снега» на экране телевизора.
- › Дробовой шум — основная составляющая внутренних шумов большинства радиоэлектронных устройств, которые приводят к аддитивному искажению слабых полезных сигналов и ограничивают отношение сигнал/шум чувствительных электронных усилителей.

Спектральная плотность дробового шума

$$S_{in}(\omega) = 2\bar{n}|S_i(j\omega)|^2 \quad \text{где} \quad S_i(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta i(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$S_i^0(j\omega) = \frac{S_i(j\omega)}{S_i(0)} \quad S_i(0) = q \quad S_{in}(\omega) = 2qI_0 |S_i^0(j\omega)|^2$$

$$D = 1 \text{ мкм}, v = 10^5 \text{ м/с} \Rightarrow \tau = 10^{-11} \text{ с}$$

$$S_i^0(j\omega) = \frac{\sin^2 0.5\omega\tau}{(0.5\omega\tau)^2} \Rightarrow f_{\max} = 1.6 \cdot 10^{11} \text{ Гц} \quad \text{для} \quad S_i^0(j\omega) = 0.9 S_i^0(0)$$

Контактный шум

- › Контактные шумы вызываются флуктуациями проводимости из-за несовершенства контакта между двумя материалами. Контактный шум имеет несколько других названий например избыточный или фликкер-шум, также его называют низкочастотным или 1/f-шумом, вследствие специфической частотной характеристики.
- › Контактный шум описывается формулой:

$$I_f^2 = \frac{A I_0^2 \Delta \nu}{f}$$

Контактный шум

- › Вследствие того, что спектральная плотность шума пропорциональна $1/f$ его называют «розовым».
- › Контактные шумы являются наиболее существенными источниками шумов в низкочастотных схемах и электрических цепях.

Импульсный шум

- › Импульсный шум, называемый также шумом лопающегося зерна, присущ полупроводниковым приборам. Этот шум обусловлен дефектами в р-п переходах и может быть устранён с повышением качества приборов. Типичный диапазон таких шумов находится в районе от сотых долей до нескольких сот герц.
- › Плотность распределения мощности такого шума имеет зависимость $1/f^2$.
- › Напряжение импульсных шумов будет наибольшим в высокоомной цепи.

Сложение напряжений шумов

- › Напряжения шумов различных типов возникают независимо и не связаны друг с другом.

$$U_{\text{общ}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots}$$

Измерение шумов

- › Шумы обычно измеряют на выходе схемы или усилителя.
 - Шумы на выходе больше по амплитуде и их легче измерить;
 - Это исключает возможность того, что прибор для измерения шумов нарушит экранирование, заземление или балансировку входной цепи.
- › Обычно для измерения шумов применяют вольтметр измеряющий действующее значение напряжения.
- › Прекрасным инструментом для измерения шумов является осциллограф. Можно контролировать форму и посмотреть спектр шума.

Выводы

- › Тепловые шумы присутствуют во всех элементах, содержащих активные сопротивления.
- › Реактивное сопротивление не генерирует тепловых шумов.
- › Дробовой шум вызывается прохождением через потенциальный барьер.
- › Контактный шум возникает везде, где ток проходит через неоднородный материал.
- › Влияние контактного шума существенно лишь на низких частотах.
- › Импульсные шумы можно устранить путём улучшения производственных процессов.

Литература

- › Г. Отт, «Методы подавления шумов и помех в электронных системах», из-во «Мир», 1979.
- › В.М. Полунин, «Физические основы измерений: конспект лекций», Курск, 2004

Флуктуационно-диссипативная теорема

$$\bar{x}(t) = \hat{\alpha}f = \int_0^{\infty} \alpha(\tau) f(t-\tau) d\tau$$

Функция $\alpha(\omega)$ определена как: $\alpha(\omega) = \int_0^{\infty} \alpha(t) e^{i\omega t} dt$

$$\alpha(\omega) = \alpha'(\omega) + i\alpha''(\omega)$$

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\hbar}{\pi} \int_0^{\infty} \alpha''(\omega) \operatorname{cth} \frac{\hbar\omega}{2T} d\omega \quad \text{теорема Каллена-Вельтона}$$