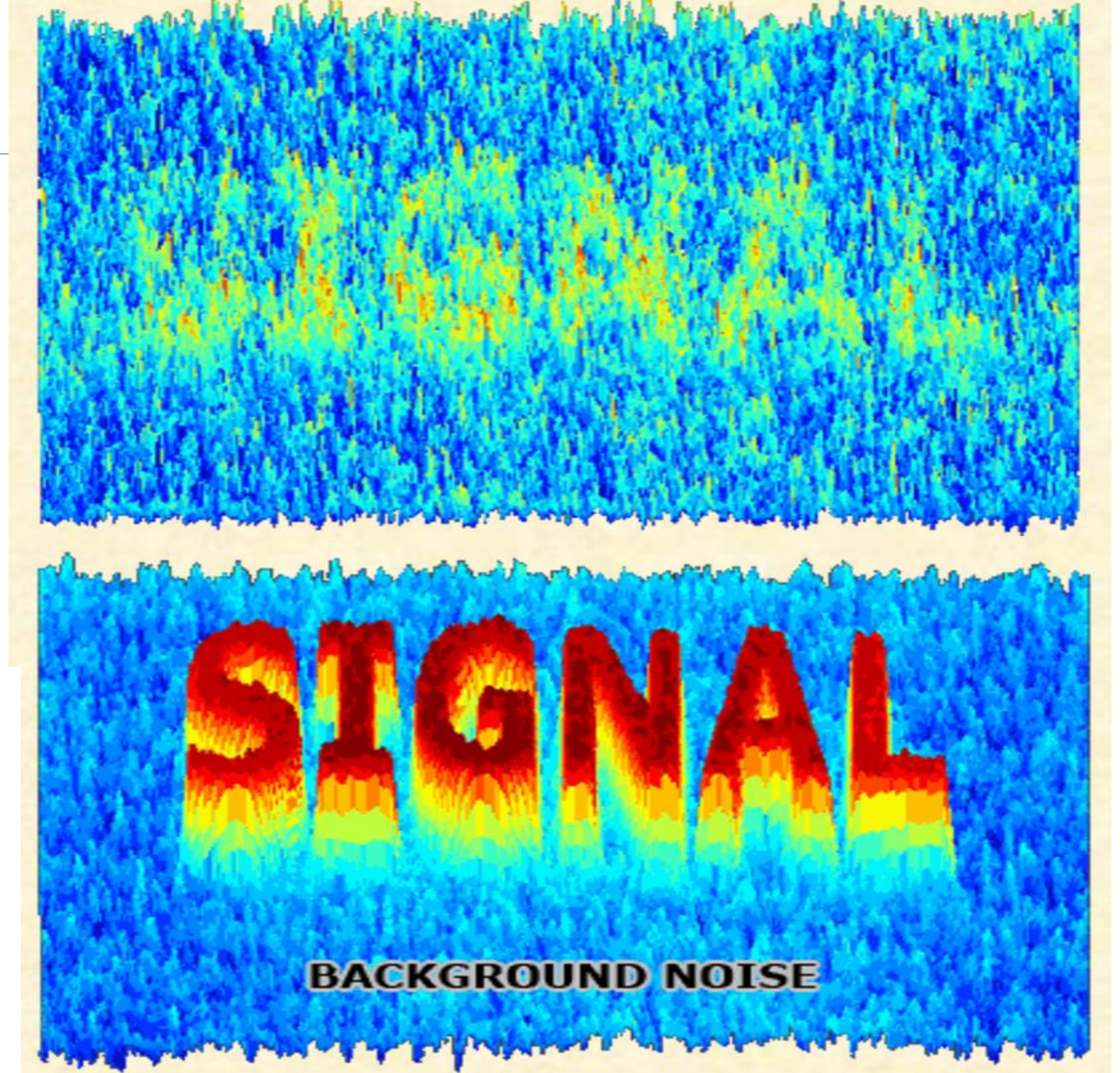
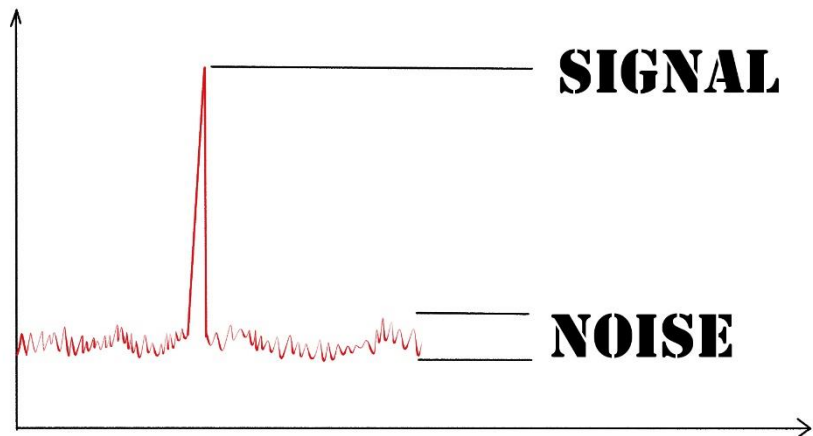


ШУМИ В ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

Вступ

Метою застосування схем на ОП є та чи інша обробка вхідного сигналу. На жаль, у реальному світі вхідний сигнал завжди містить небажані шумові компоненти накладені на корисний сигнал.

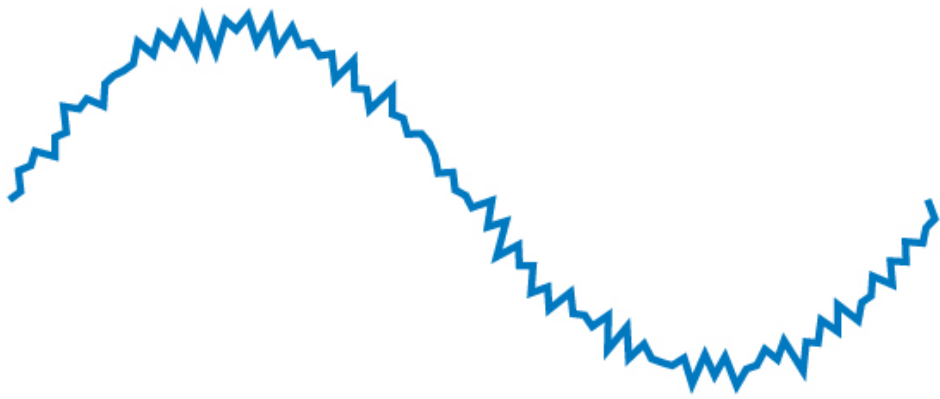
Шуми неможливо видалити із корисного сигналу повністю. Можна тільки послабити їх, і для цього потрібно розуміння їхньої природи виникнення та закономірностей, яким вони підкоряються.



Вплив шуму на аналоговий та цифровий сигнали

Analog Signal

SIGNAL + NOISE

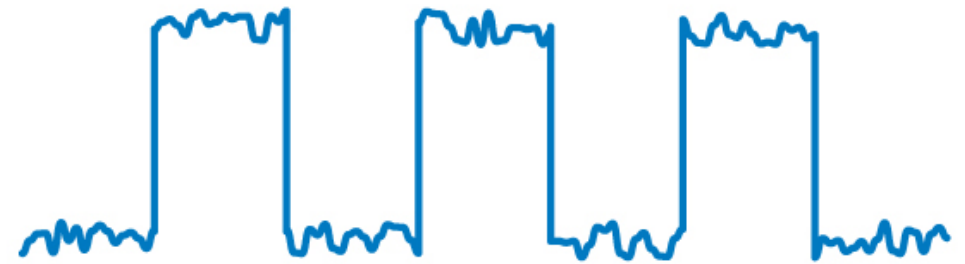


NOISE



Digital Signal

SIGNAL + NOISE



NOISE



Моделювання накладання шуму на сигнал

First we generate a spiky signal.

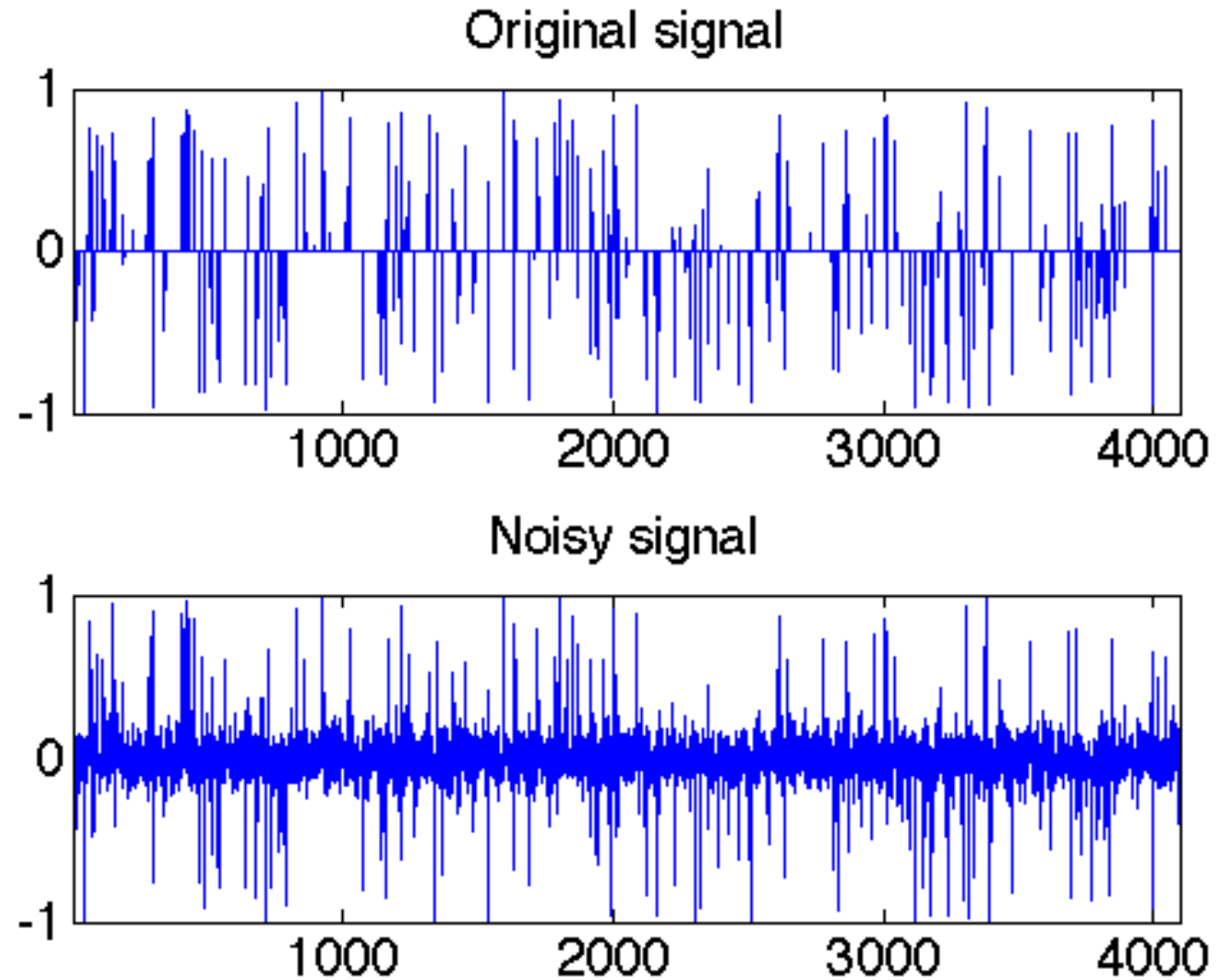
```
% dimension
n = 4096;
% probability of spiking
rho = .05;
% location of the spike
x0 = rand(n,1)<rho;
% random amplitude in [-1 1]
x0 = 2 * x0 .* ( rand(n,1)-.5 );
```

We add some gaussian noise

```
sigma = .1;
x = x0 + randn(size(x0))*sigma;
```

Display.

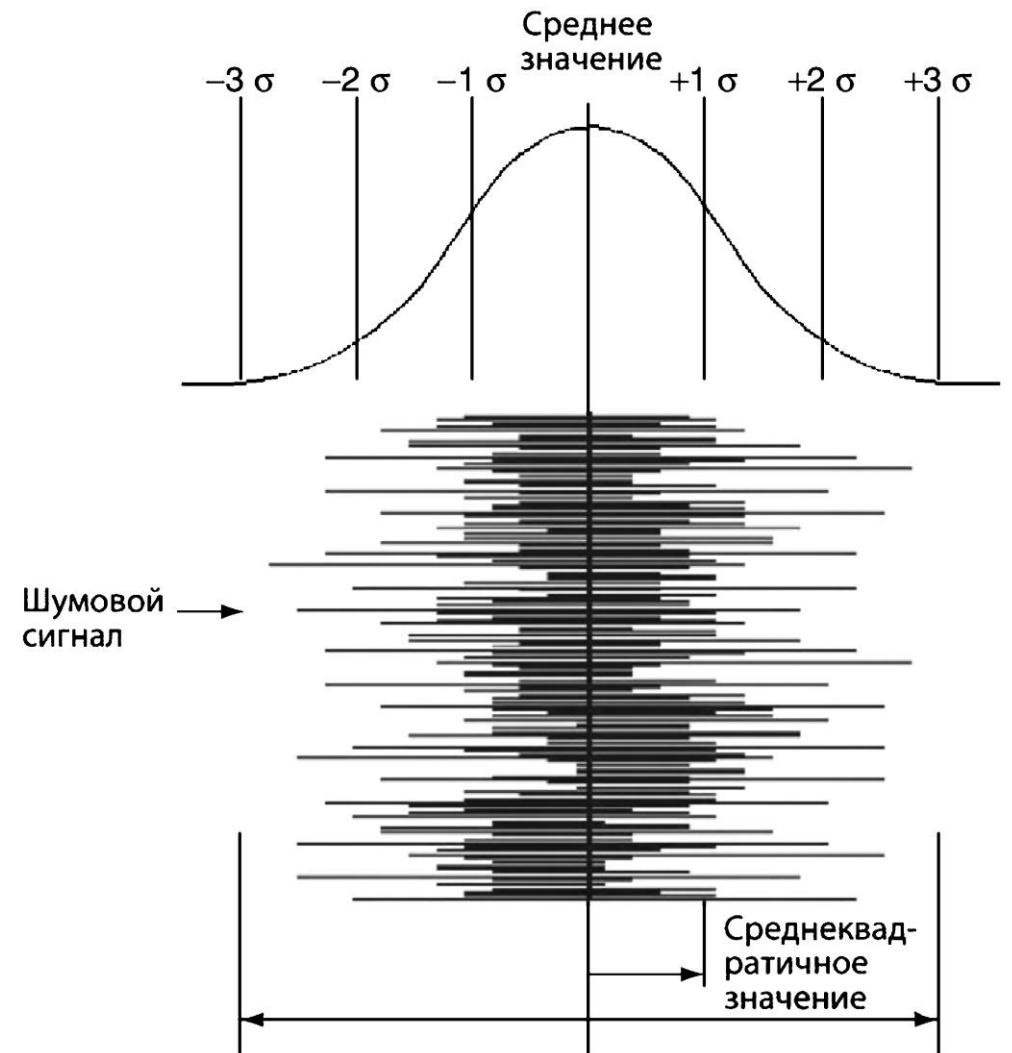
```
clf;
subplot(2,1,1);
plot(x0); axis([1 n -1 1]);
set_graphic_sizes([], 20);
title('Original signal');
subplot(2,1,2);
plot(x); axis([1 n -1 1]);
set_graphic_sizes([], 20);
title('Noisy signal');
```



Випадкова природа шумів

Шуми - це суто випадкові сигнали, миттєве значення яких або фазу неможливо передбачити у часі. Шуми можуть генеруватися всередині ОП чи пов'язаними з ним пасивними елементами, чи потрапляти у схему із зовнішніх джерел.

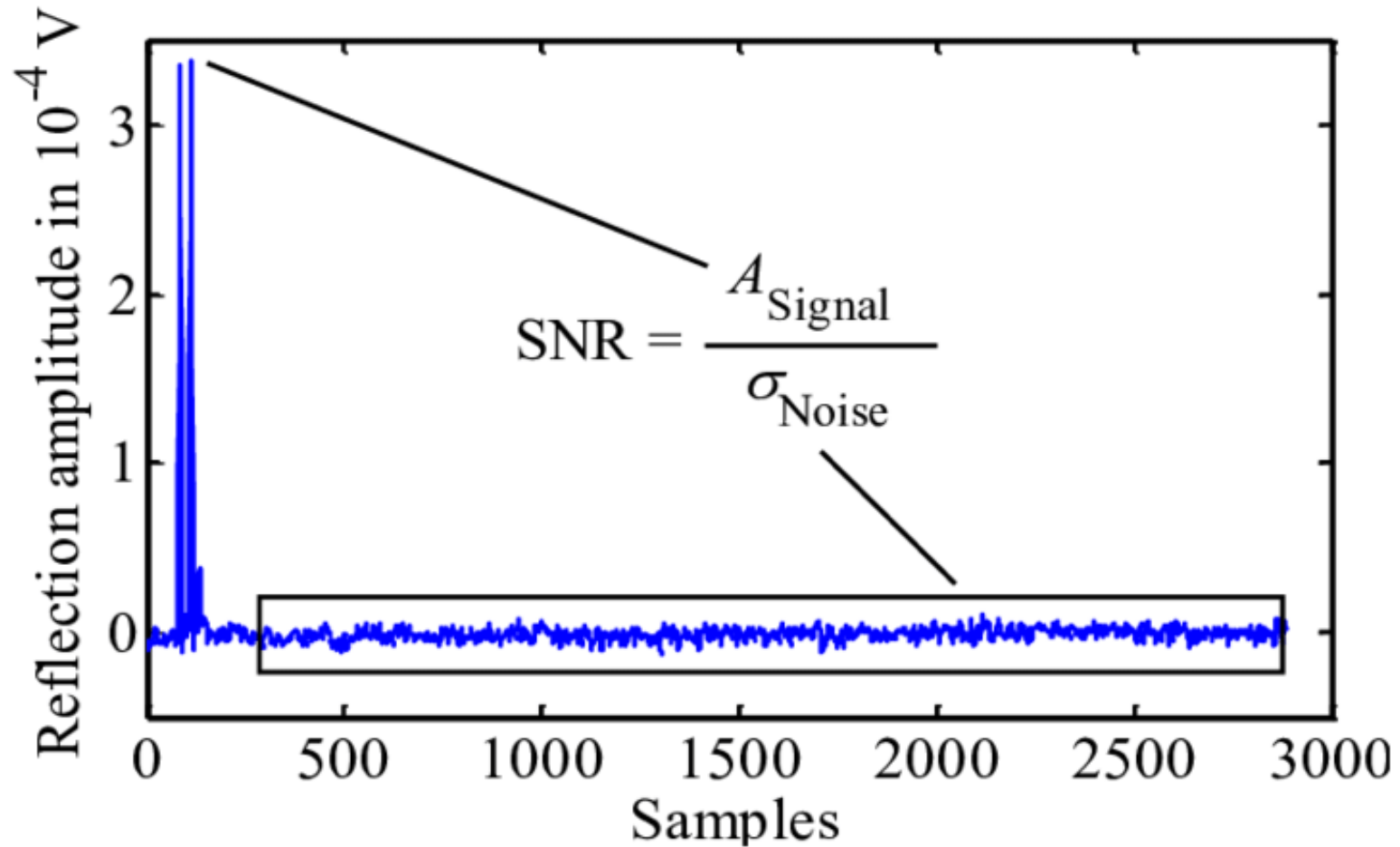
Миттєве значення напруги шумів може бути як позитивним, і негативним. Осцилограма шуму є випадковим розподілом із центром поблизу нульового рівня. Оскільки джерела шуму створюють напругу, що змінюється у часі випадковим чином, шуми можуть бути описані лише функцією густини ймовірності. Найбільш широко для опису густини ймовірності шумів використовується функція Гауса. У функції ймовірності Гауса є середнє значення амплітуди, ймовірність якої найбільша. При амплітуді шуму вище або нижче середнього значення ймовірність спадає, утворюючи графік дзвоноподібної форми, симетричний щодо центрального значення.



С вероятностью 99.7% напряжение шума находится в пределах 6σ

Співвідношення сигнал/шум

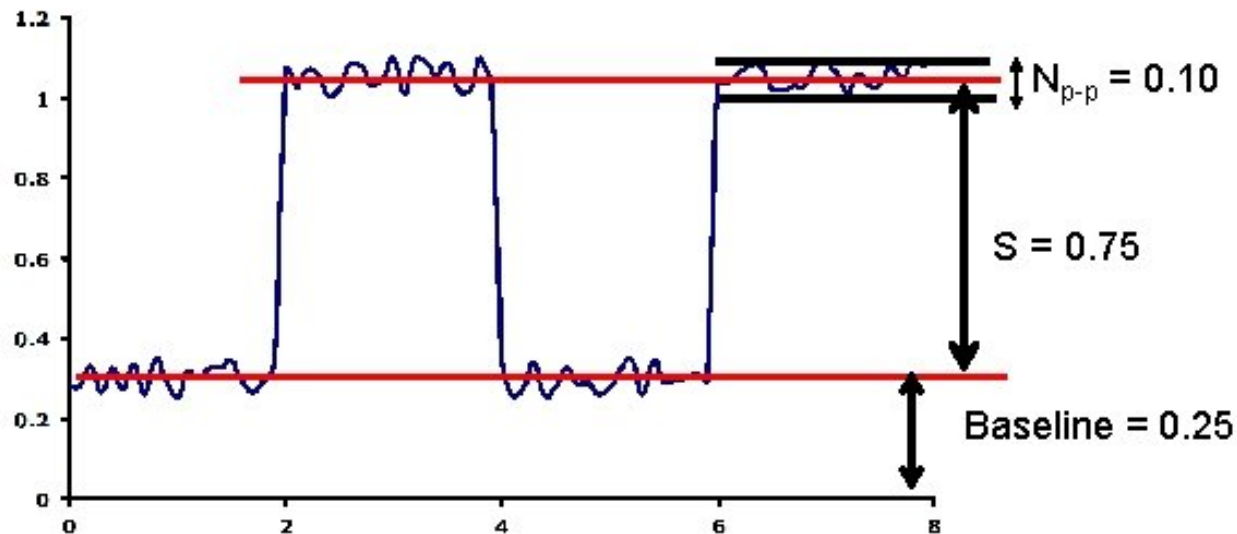
SNR-Calculation from measurement data



Співвідношення сигнал/шум

Signal-to-Noise Ratio

Total signal level nor noise level determine an experiment's ability to accurately detect an analyte. Rather it is the ratio of the two that is critical. **The S/N Ratio.**



$$N_{\text{RMS}} = 0.354 N_{p-p} = 0.354 \times 0.10 = 0.035$$

$$S/N = 0.75/0.035 = 21.4$$

Співвідношення сигнал/шум

Signal-to-Noise Ratio (S/N)

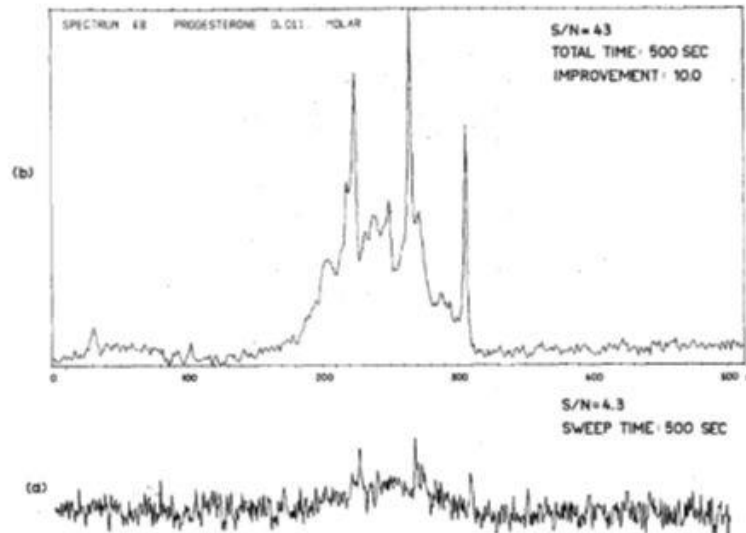
- Signal-to-noise ratio (S/N) is a measure of the quality of an instrumental measurement
 - Ratio of the mean of the analyte signal to the standard deviation of the noise signal
- High value of S/N : easier to distinguish analyte signal from the noise signal



$$RSD = \frac{s}{\bar{x}}$$

signal \rightarrow $S/N = \frac{\bar{x}}{s}$ ← Std. Dev.

$$S/N = \frac{1}{RSD}$$



Mostly
Signal

Mostly
Noise

%RSD is the percent relative standard deviation (sometimes called the coefficient of variation [CV])

Додавання шумів від різних джерел

Коли у схемі є кілька джерел шуму, сумарна середньоквадратична напруга шуму дорівнює квадратному кореню із суми квадратів середньоквадратичних значень напруги всіх джерел шуму:

$$E_{\text{TOTALrms}} = \sqrt{e_{1\text{rms}}^2 + e_{2\text{rms}}^2 + \dots + e_{n\text{rms}}^2}$$

Тут «rms» - root mean square — середнє квадратичне значення змінного струму або напруги – це те ж саме, що і діюче значення змінного струму/напруги.

Цей вираз є ключовим для тих, хто має справу з шумами. Якщо у схемі є два джерела шуму з однаковими шумовими напругами, то сумарний шум не подвоюється (тобто не збільшується на 6 дБ), а збільшується лише на 3 дБ. Розглянемо найпростіший приклад підсумовування шумів від двох джерел із середньоквадратичною напругою 2 мкВ:

$$E_{\text{TOTALrms}} = \sqrt{2^2 + 2^2} = \sqrt{8} = 2.83 \text{ мкВ.}$$

$$20 \lg(2.83/2) = 3.01 \text{ дБ}$$

Одиниці вимірювання

Шум зазвичай вказується у вигляді спектральної густини, що має розмірність середньоквадратичного значення у вольтах чи амперах, поділеного на корінь квадратний із герц: $V/\sqrt{\text{Гц}}$ або $A/\sqrt{\text{Гц}}$. Таким чином, для визначення напруги шумів необхідно знати, у якому частотному діапазоні вони мають враховуватися.

Наприклад, ОП типу TLE2027, що має спектральну щільність шумів $2.5 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$, використовується у звуковому діапазоні частот від 20 Гц до 20 кГц з коефіцієнтом посилення 40 дБ. Вихідна напруга дорівнює 1 (0 дБВ). Квадратний корінь зі смуги частот (20000 Гц...20 Гц) дорівнює $141.35 \text{ Гц}^{1/2}$. Добуток цього числа на спектральну щільність дає еквівалентну шумову напругу на вході 353.38 нВ. На виході напруга шумів на 40 дБ (тобто в 100 разів) більше, тобто 35.3 мкВ. Відношення сигнал/шум у цьому випадку дорівнює

$$20 \lg(1 \text{ В} / 35.3 \text{ мкВ}) = 20 \lg(28329) = 89 \text{ дБ.}$$

Таким чином, ОП TLE2027 має чудові шумові характеристики для застосування у звуковому діапазоні частот. Однак слід пам'ятати, що шуми пасивних компонентів та зовнішніх джерел можуть погіршити шуми системи загалом.

Класифікація шумів

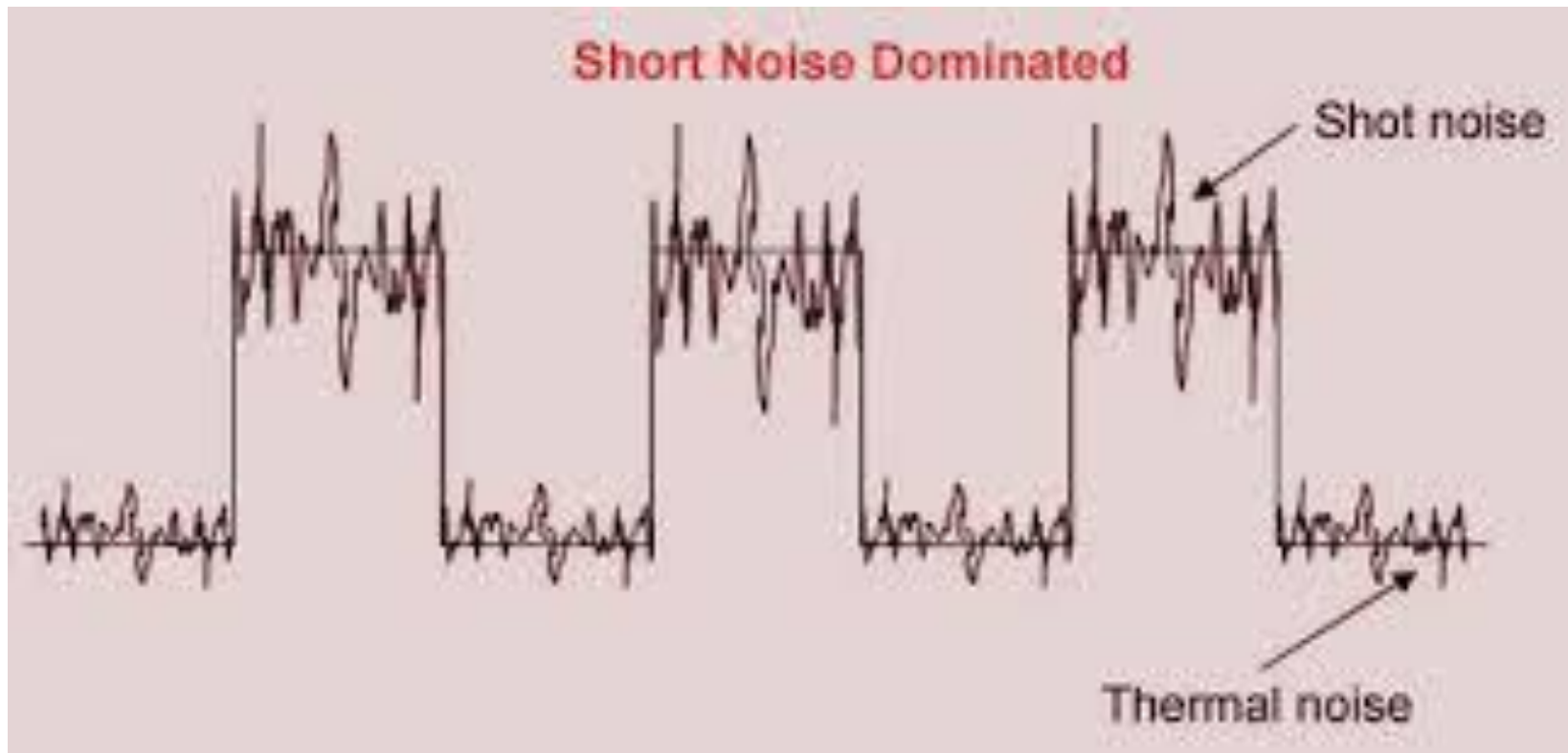
В ОП та пов'язаних з ними електричних колах проявляються шуми п'яти типів:

- 1. Дробові шуми.**
- 2. Теплові шуми.**
- 3. Шуми, викликані флікер-ефектом (миготливі шуми).**
- 4. Імпульсні шуми.**
- 5. Шуми лавинного пробою.**

У схемах на ОП можуть бути деякі з цих типів шумів або навіть усі. У більшості випадків розділити їх вплив не є можливим. Але знання основних причин їх виникнення може допомогти розробнику оптимізувати конструкцію та мінімізувати шуми в необхідному діапазоні частот. Розробка мал шумливих схем вимагає також пошуку певного балансу між внутрішніми та зовнішніми джерелами шуму.

Дробовий шум (shot noise)

Дробові шуми, також іноді звані квантовими шумами, викликаються випадковими флуктуаціями в русі носіїв зарядів провідників. Іншими словами, перебіг електричного струму є неоднорідним. Електричний струм створюється електронами, що рухаються під впливом різниці потенціалів. Коли на шляху свого руху електрони зустрічають бар'єр (наприклад, p-n-перехід), потенційна енергія накопичуваного заряду зростає до того часу, поки її стане достатньо для перетину цього бар'єру. Для електронів, що перетнули бар'єр, потенційна енергія перетворюється на кінетичну.



Дробовий шум (shot noise)

Сукупний ефект від нерівномірного у часі перетину бар'єра електронами та створює дробовий шум. Посилений дробовий шум у діапазоні звукових частот нагадує звук дробу, що сипається на бетонну підлогу.

Дробовий шум має такі характеристики:

- Він виникає лише при перебігу струму. Якщо немає струму, немає і цього виду шуму.
- Струм дробового шуму не залежить від температури.
- Спектральна щільність дробового шуму залежить від частоти, тобто його середньоквадратичне значення у фіксованій смузі частот однакове на будь-якому частотному відрізку.
- Дробовий шум проявляється при протіканні струму через будь-який провідник (а не лише напівпровідник). У провідниках бар'єри утворюються рахунок будь-яких домішок та неоднорідностей, що завжди присутні в металах. Рівень дробового шуму при цьому, однак, дуже малий через малу відносної величини бар'єрів у провідниках та величезної кількості електронів, що у перебігу струму. У напівпровідниках дробовий шум виражений набагато сильніше.

Дробовий шум

Среднеквадратичное значение дробового шума равно

$$I_{SH} = \sqrt{(2qI_{DC} + 4qI_0)B}, \quad (12.6)$$

где

q — заряд электрона (1.6×10^{-19} Кл),

I_{DC} — средний прямой постоянный ток в амперах,

I_0 — обратный ток насыщения в амперах,

B — полоса частот в герцах.

Если p - n -переход смещён в прямом направлении, I_0 равен нулю, и второй член в выражении (12.6) исчезает. С использованием закона Ома можно рассчитать динамическое сопротивление p - n -перехода:

$$r_d = \frac{kT}{qI_{DC}}. \quad (12.7)$$

Среднеквадратичное напряжение дробового шума равно

$$E_{SH} = kT \sqrt{\frac{2B}{qI_{DC}}}, \quad (12.8)$$

где

k — постоянная Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/Кл),

q — заряд электрона ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл),

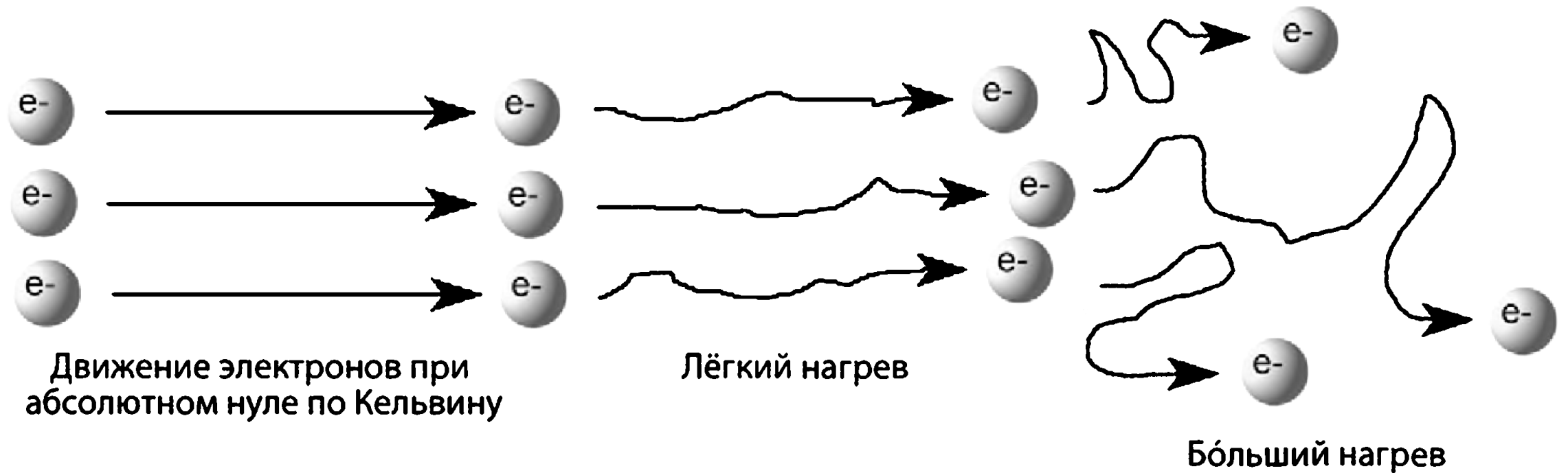
T — температура в кельвинах,

I_{DC} — средний прямой постоянный ток в амперах,

B — полоса частот в герцах.

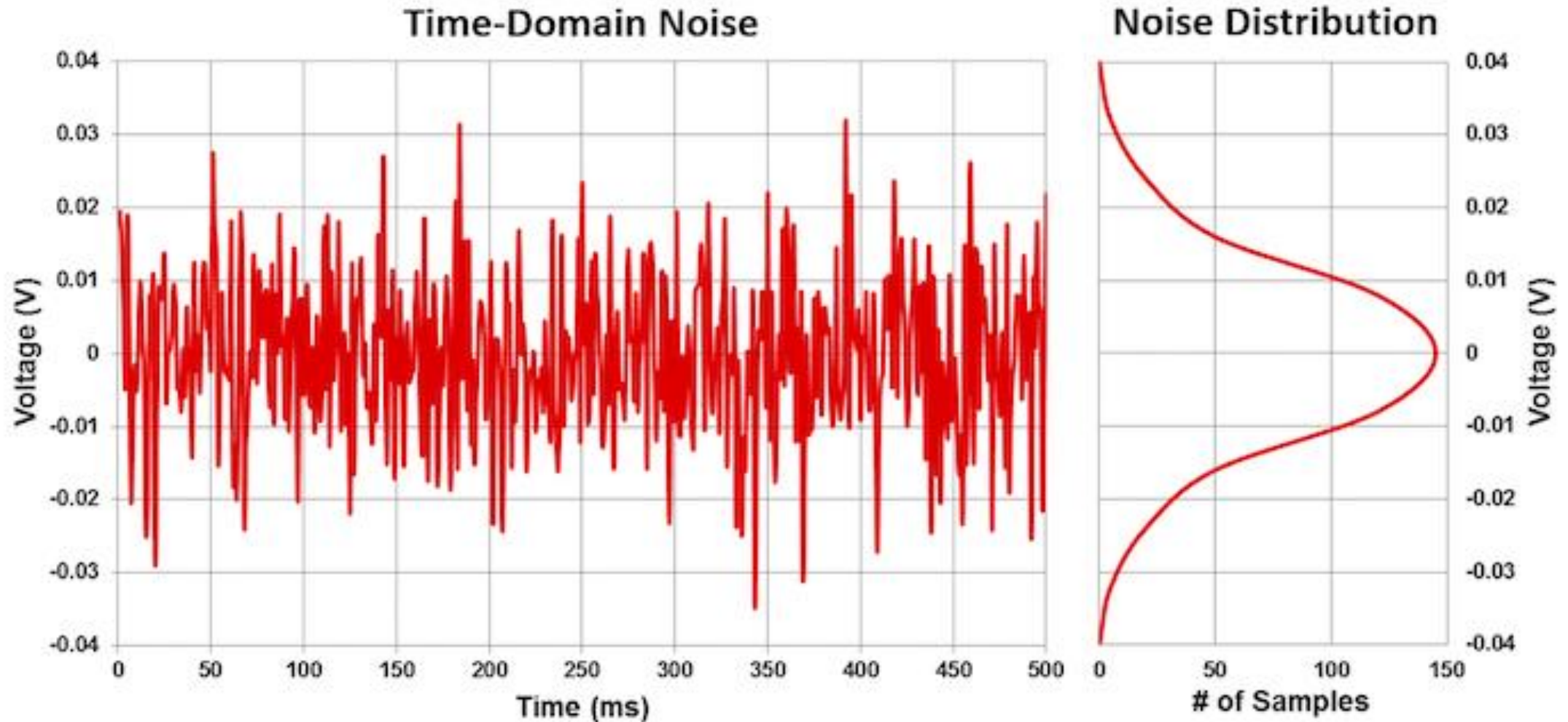
Тепловий шум

(білий шум, thermal noise, white noise, шум Джонсона-Найквіста)



Тепловий шум

(білий шум, thermal noise, white noise, шум Джонсона-Найквіста)



Тепловий шум

(білий шум, thermal noise, white noise, шум Джонсона-Найквіста)

При частотах ниже 100 МГц для напряжения и тока шума справедливы соотношения Найквиста:

$$E_{\text{ТН}} = \sqrt{4kTRB}, \quad (12.11)$$

$$I_{\text{ТН}} = \sqrt{\frac{4kTRB}{R}}. \quad (12.12)$$

где

$E_{\text{ТН}}$ — среднеквадратичное напряжение шума в вольтах,

$I_{\text{ТН}}$ — среднеквадратичный ток шума в амперах,

k — постоянная Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/Кл),

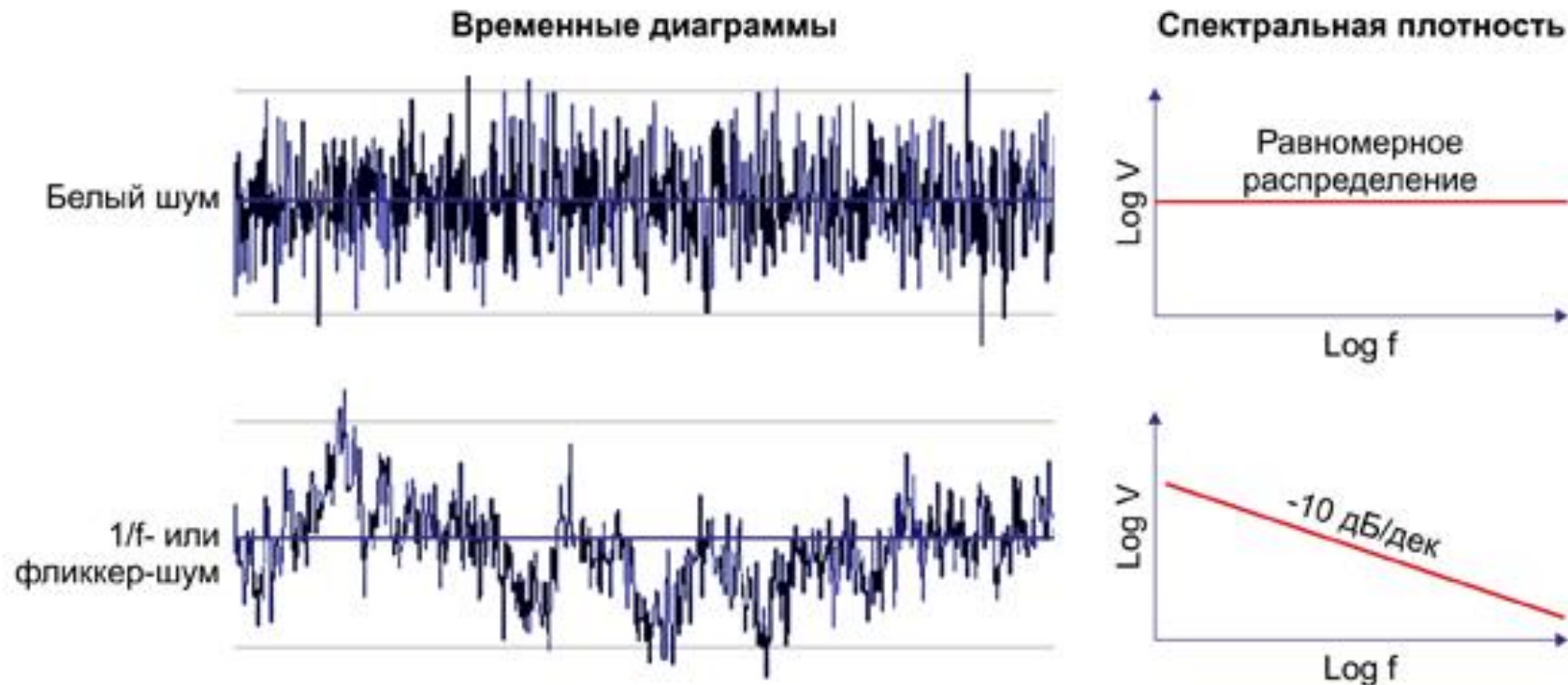
T — температура в кельвинах,

B — полоса частот в герцах,

R — сопротивление в омах.

Флікер-шум (рожевий шум)

Флікерний шум – це тип електронного шуму зі спектральною щільністю потужності $1/f$. Тому його часто називають шумом $1/f$ або рожевим шумом, хоча ці терміни мають більш широкі визначення. Він зустрічається майже у всіх електронних пристроях і може проявлятися з різними іншими ефектами, такими як домішки в провідному каналі, шум генерації та рекомбінації в транзисторі через базовий струм тощо.



Червоний та коричневий шуми

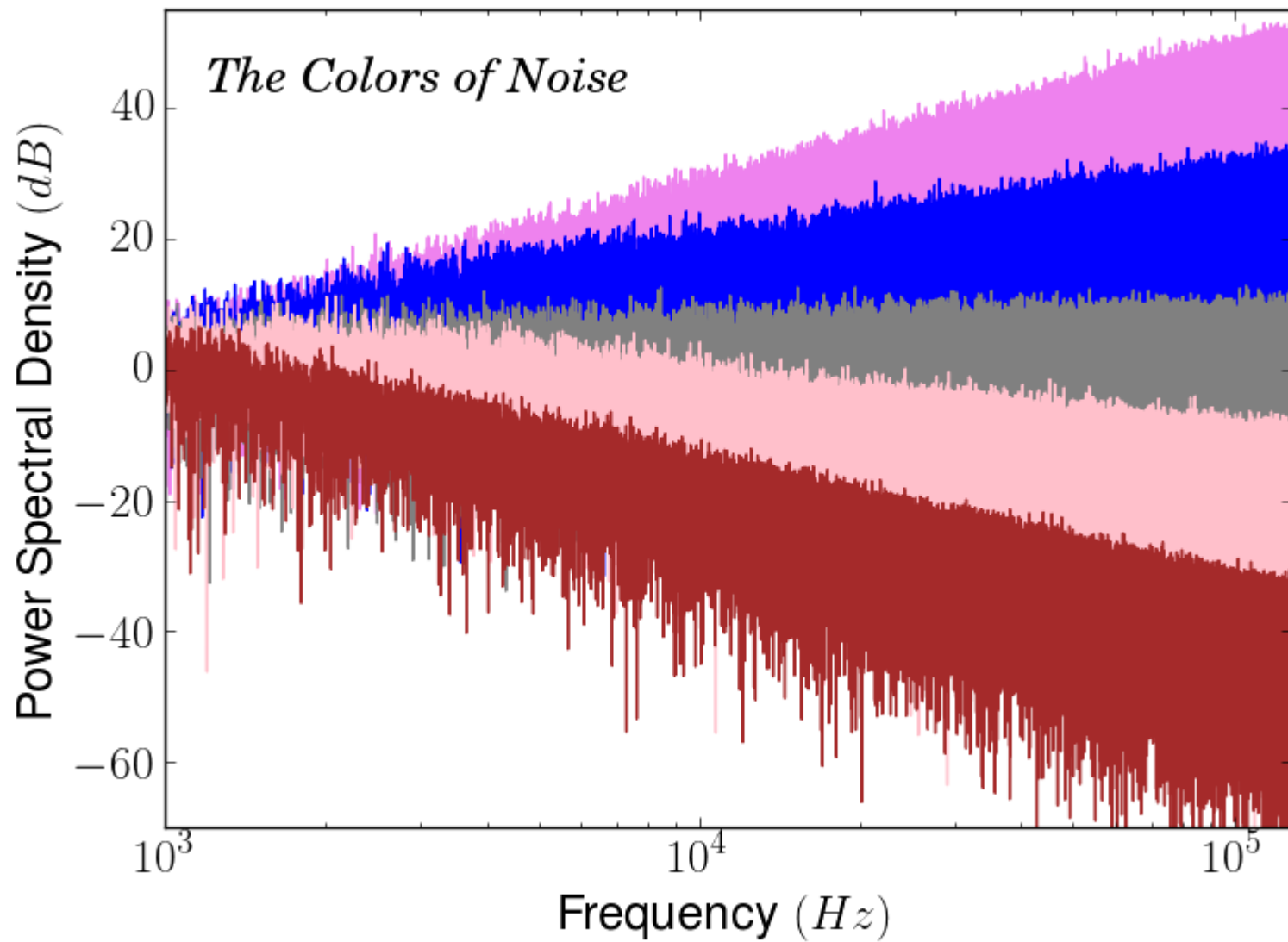
Червоний шум – не дуже поширений термін для позначення типу шуму. У багатьох літературних джерелах використовується термін "коричневий шум", якому і приписують властивості червоного. Але це швидше питання естетики — якщо використовувати термін «коричневий шум», тоді рожевий шум слід було б називати бронзовим (жовто-коричневим). А вже якщо прийнято назву «рожевий шум», то наступний за колірним спектром виявляється червоний. Хоча є і пояснення терміну коричневий шум.

закономірність $1/f^2$ характерна для шумів, створюваних броунівським рухом, відкритим Робертом Броуном (Robert Brown), прізвище якого перекладається як "коричневий". Спектральна густина цього шуму спадає із зростанням частоти зі швидкістю -6 дБ на октаву.

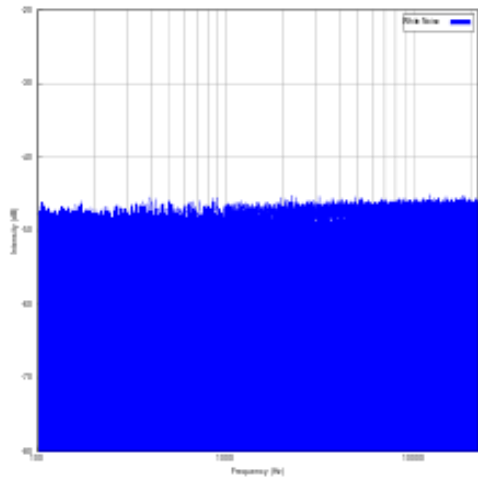
У природі червоний/коричневий шум проявляється, наприклад, акустичні характеристики великих обсягів води.

Імпульсні шуми та шуми лавинного пробою іноді апроксимують характеристикою червоного/коричневого шуму, але коректніше все ж таки їх представляти як рожеві шуми.

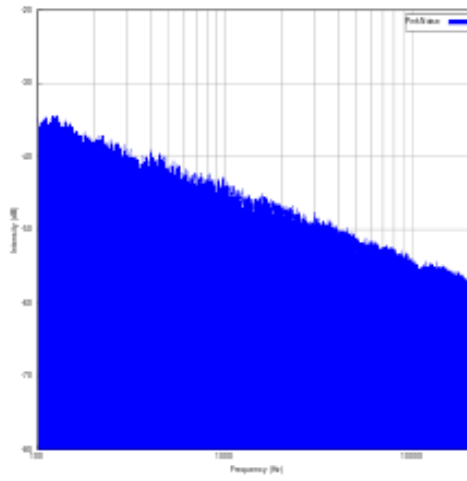
Кольори шумів



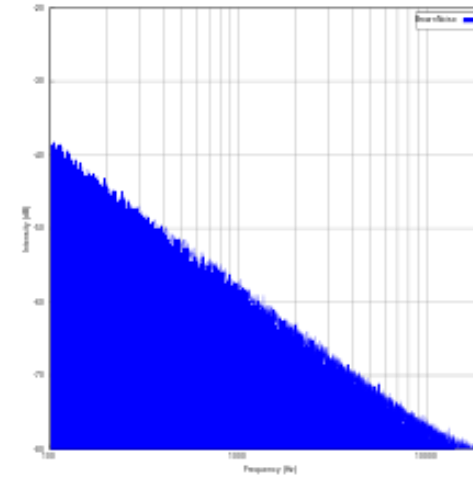
Спектри шумів



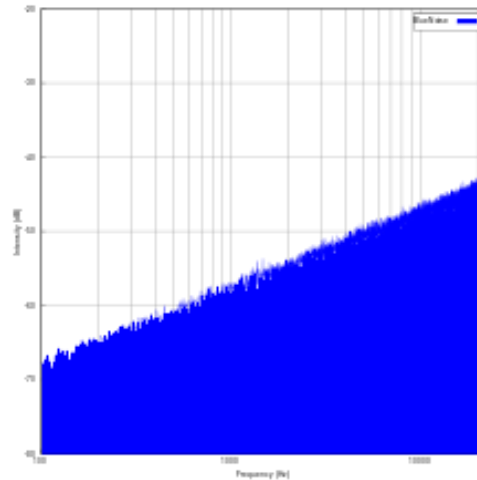
Білий



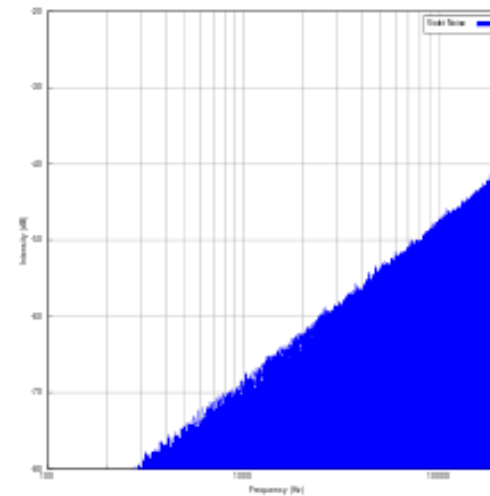
Рожевий



Червоний/коричневий

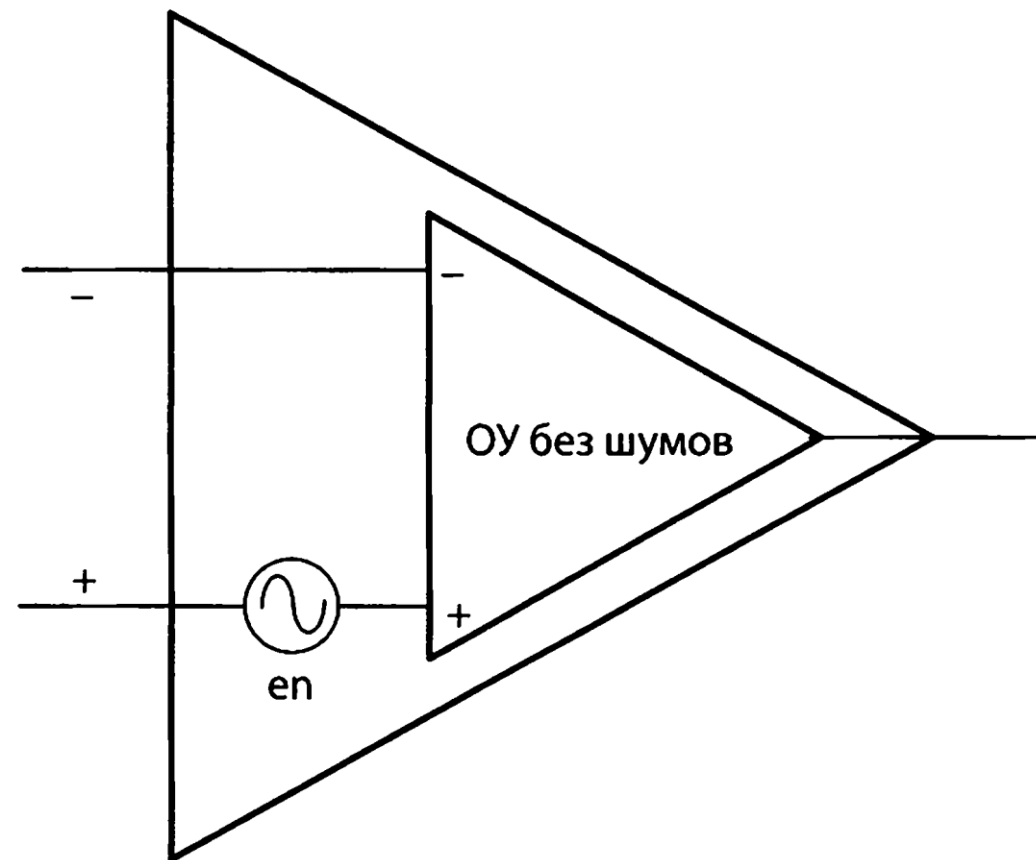
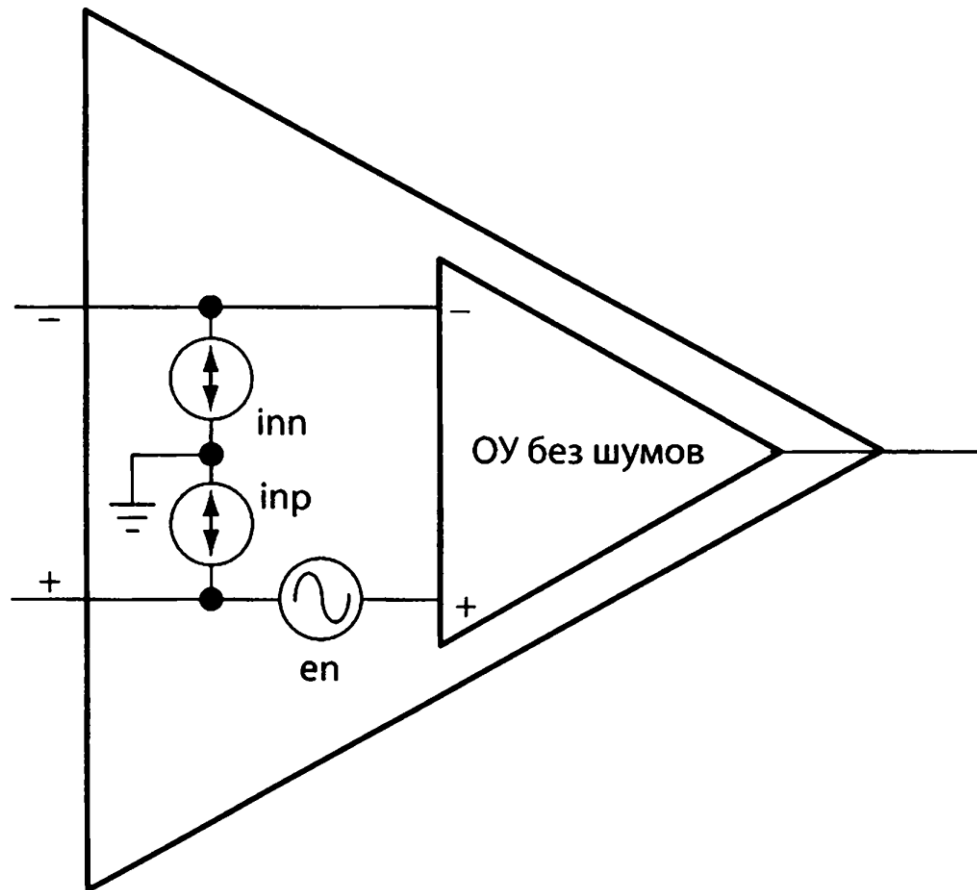


Синій

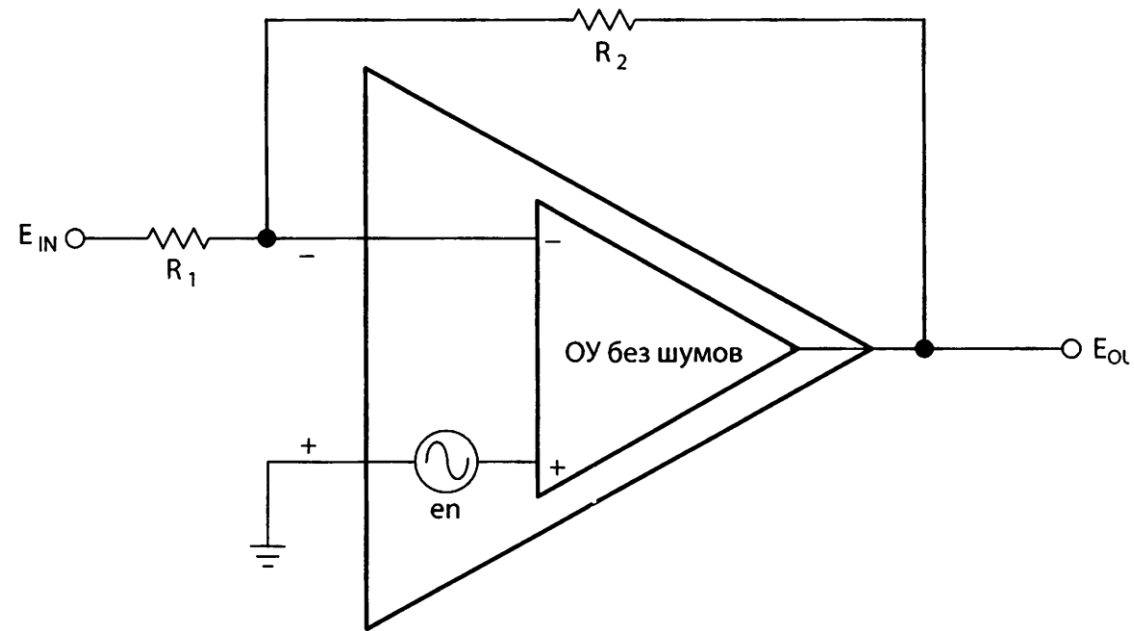
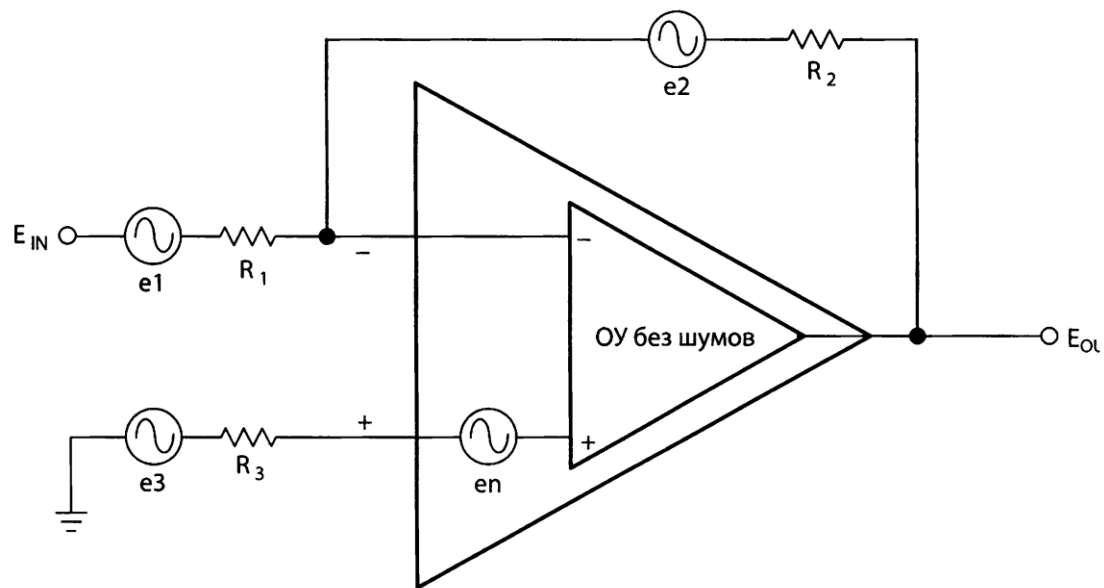


Фіолетовий

Шумові моделі ОП

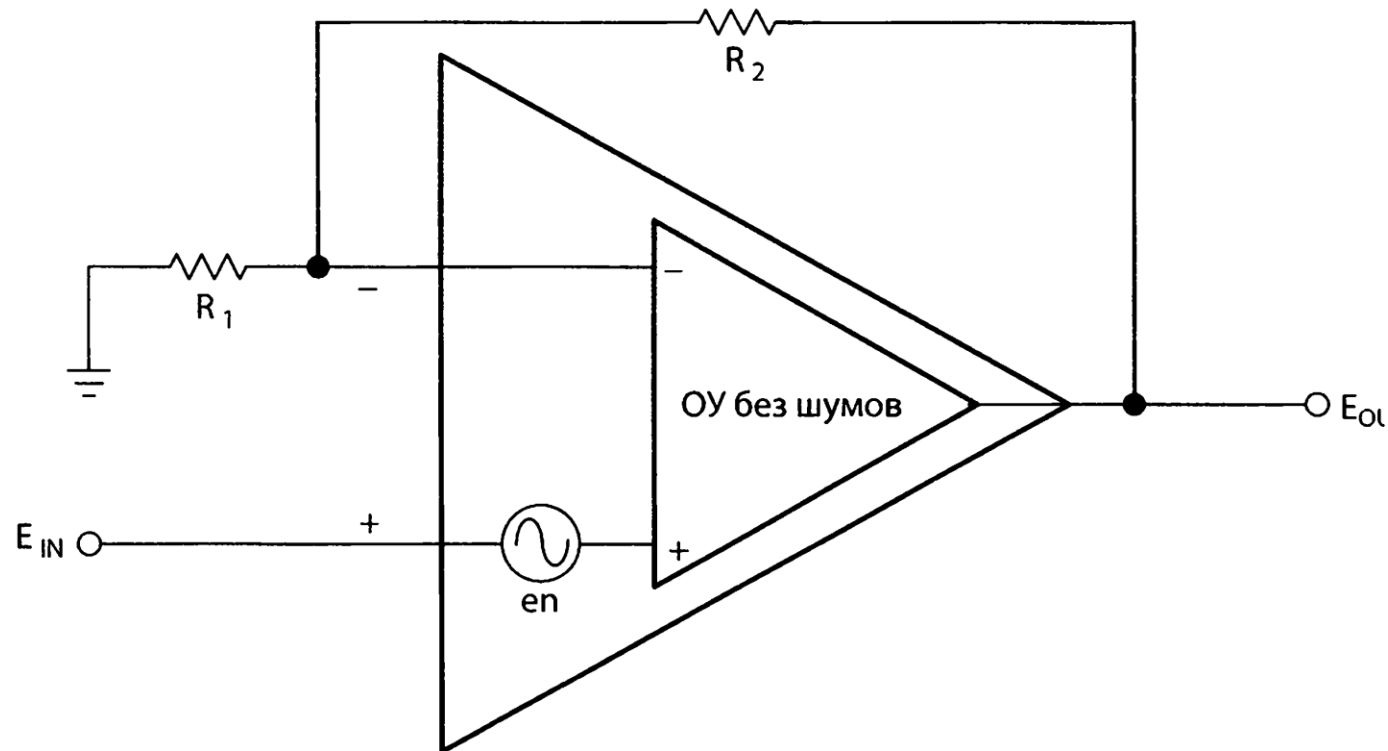


Шумова модель інвертуючого ОП



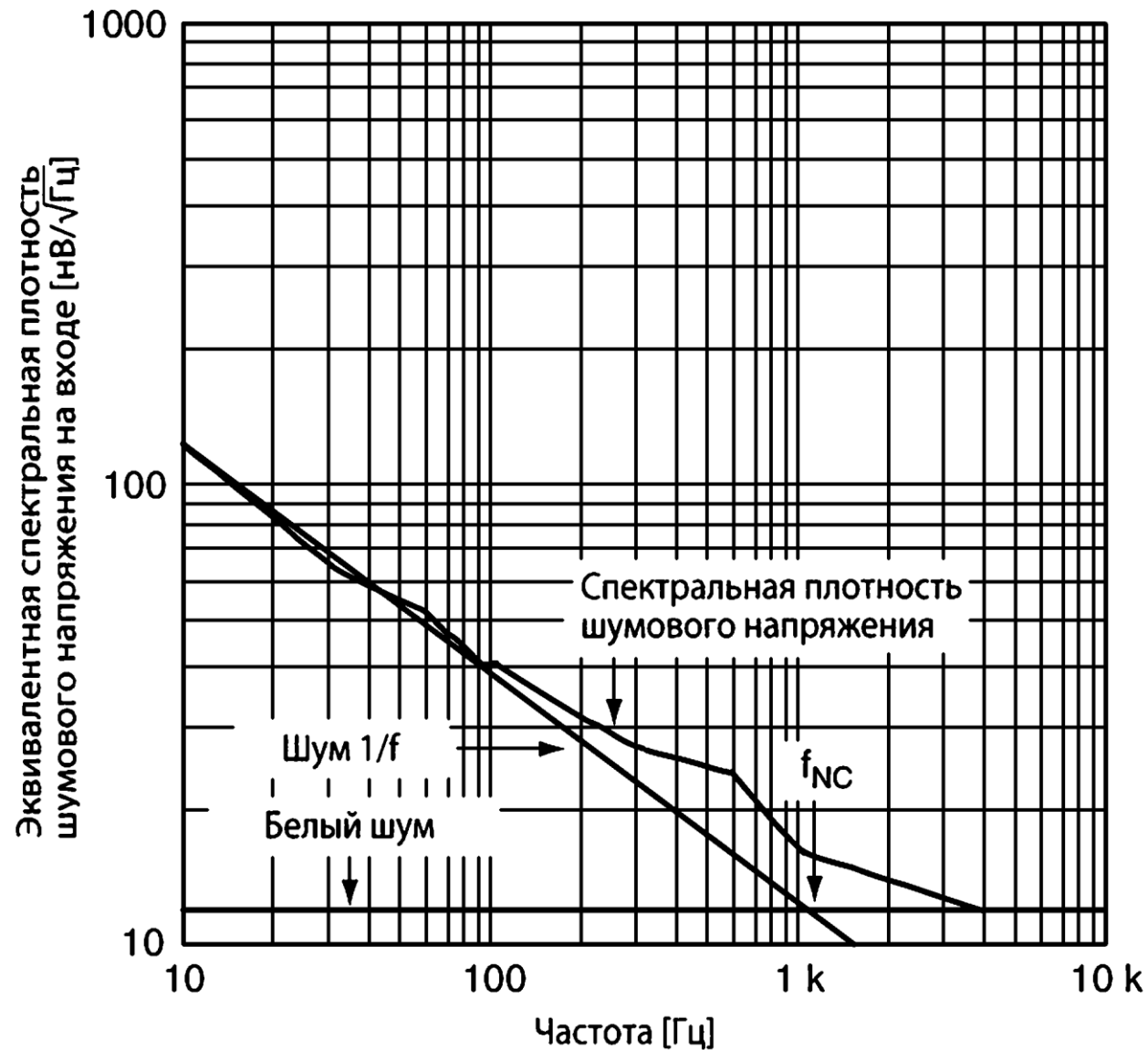
$$E_{OUT} = \sqrt{\left(E_{IN} \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + \left[e_n + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\right]^2}$$

Шумова модель неінвертуючого ОП



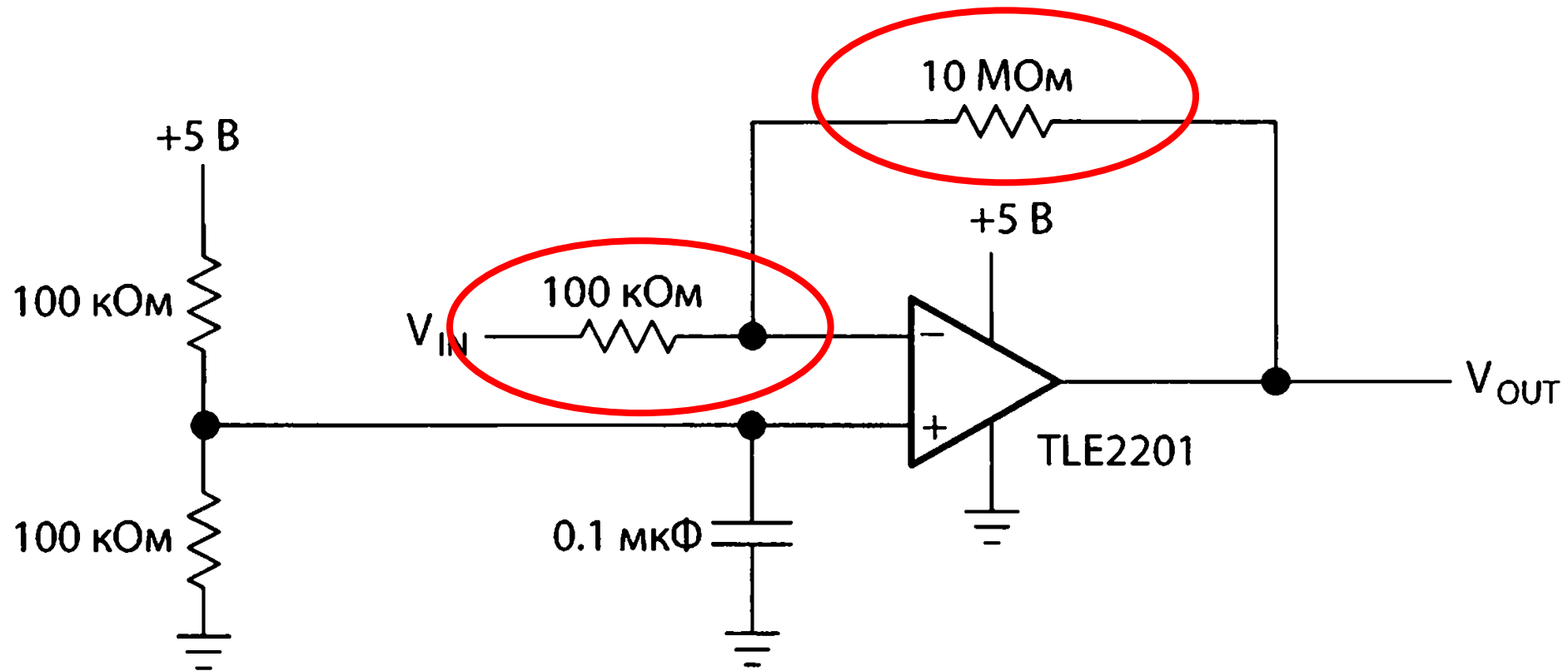
$$E_{OUT} = \sqrt{\left(E_{IN} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right)^2 + \left[e_n + \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right]^2}.$$

Шумова характеристика ОП

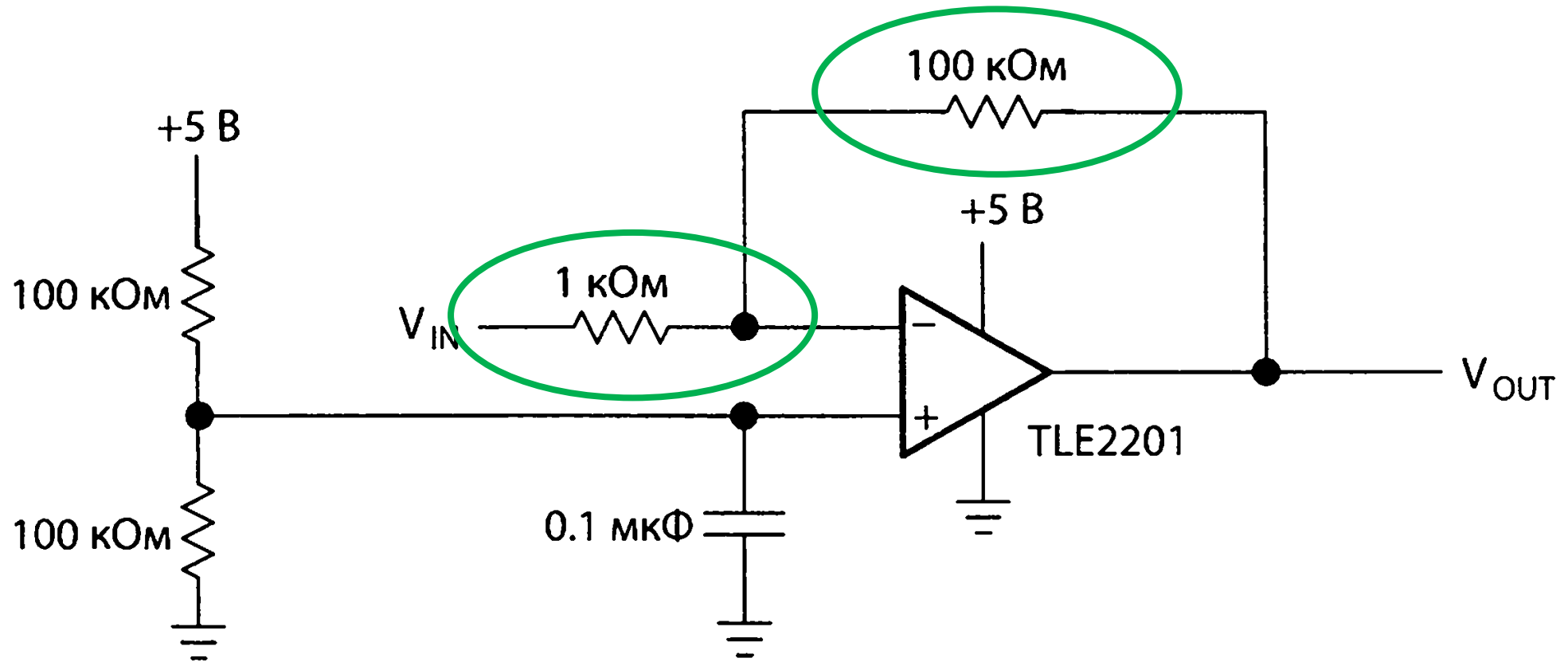


На низких частотах домінує рожевий шум. На високих – білий.

Приклад: підсилювач звукових частот



Приклад: підсилувач звукових частот



Резюме

Шуми є скрізь. Нейтралізувати їх важко. Їх можна лише зменшити правильним підбором електрорадіоелементів.

Єдиний шлях збільшення відношення сигнал/шум у схемах з ОП, крім вибору самого малозумного типу ОП, полягає у використанні попереднього підсилювача на дискретному малозумному транзисторі.

Спектральна щільність шумів таких транзисторів не перевищує $1 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$, що набагато менше, ніж у найкращих типів ОП. Якщо не потрібен високий вхідний опір, то використовуються біполярні транзистори, а якщо вхідний опір має бути близько 100 кОм і вище, краще застосовувати польові транзистори.

