

## **Приймання та оброблення сигналів**

## **Шум елементів приймача**

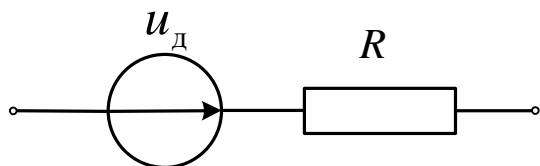
## Загальні положення

У *загальному випадку* до шумів елементів приймача відносять:

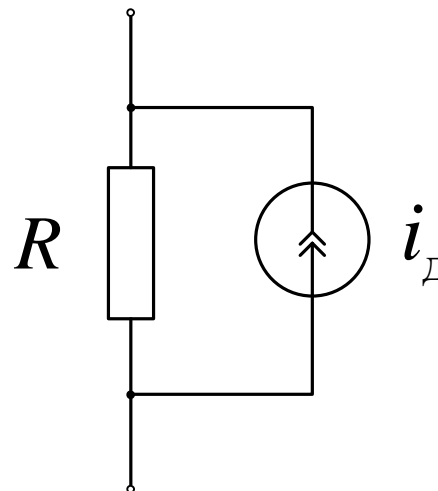
- шум резисторів;
- шум коливального контуру;
- шум приймальної антени;
- шум біполярних і польових транзисторів;
- шум діодів.

## Шум резисторів

Схеми заміщення реальних резисторів:



$$u_d = \sqrt{u_{ш}^2} = \sqrt{4kTR\Delta f_{ef}}$$



$$i_d = \sqrt{i_{ш}^2} = \sqrt{4kTg\Delta f_{ef}}$$

Ці схеми заміщення рівноправні. Джерела ЕРС доцільно використовувати при аналізі кіл з послідовним включенням шумівних елементів, а джерела струму – з паралельним.

## Шум резисторів

**Зверніть увагу!** При оцінюванні рівня шуму, з метою уникнення помилок, додають не потужності шуму джерел, включених послідовно чи паралельно, а квадрати напруг чи струмів шуму, а саме: при послідовному включенні реальних резисторів складають квадрати ЕРС окремих генераторів шуму; при паралельному з'єднанні – квадрати струмів шумів.

При *послідовному включенні* декількох джерел зручно замінити їх на еквівалентний генератор шумової напруги, тоді результуюча напруга становитиме

$$u_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{ui}^2}$$

Послідовно з таким генератором шумової напруги потрібно включити опір

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n R_i$$

## Шум резисторів

При *паралельному включенні* джерел шумів зручніше кожен з них замінити на еквівалентний генератор шумового струму, сумарне значення якого становитиме

$$i_{\text{д}\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n i_{\text{ш}i}^2}$$

Паралельно до такого генератора шумового струму потрібно підключити провідність:

$$G_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n G_i$$

Змішані схеми включення джерел шумів приводять або до схеми еквівалентного генератора шумової напруги  $u_{\text{д}\Sigma}$ , або ж до схеми еквівалентного генератора шумового струму  $i_{\text{д}\Sigma}$ .

## Шум резисторів

Іноді шумівні опори можуть мати різну температуру. За такої ситуації для оцінювання параметрів сумарного еквівалентного шумового генератора зручно використовувати поняття шумової температури.

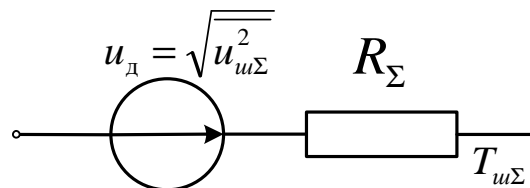
**Приклад.** Два послідовно включених резистори з опорами  $R_1$ ,  $R_2$ , та температурами  $T_1$ ,  $T_2$  відповідно.

**Розв'язок.** Використовуючи формулу Найквіста та правило для послідовно з'єднаних опорів, маємо:

$$\overline{u_{u\Sigma}^2} = 4k(T_1 R_1 + T_2 R_2) \Delta f_{ef} = 4k T_{u\Sigma} R_\Sigma \Delta f_{ef},$$

$$\text{де } R_\Sigma = R_1 + R_2, \quad T_{u\Sigma} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} T_1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} T_2.$$

Еквівалентна схема при цьому матиме вигляд

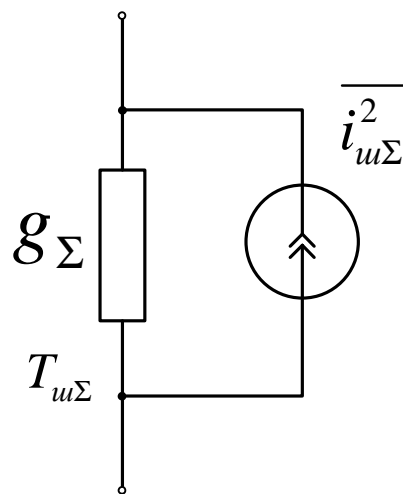


## Шум резисторів

Аналогічно можна знайти еквівалентну температуру двох паралельно включених провідностей  $g_1$ ,  $g_2$ , з температурами  $T_1$ ,  $T_2$  відповідно:

$$\overline{i_{u\Sigma}^2} = 4kT_{u\Sigma}g_{\Sigma}\Delta f_{ef},$$

$$\text{де } g_{\Sigma} = g_1 + g_2, \quad T_{u\Sigma} = \frac{G_1}{G_1 + G_2}T_1 + \frac{G_2}{G_1 + G_2}T_2.$$



## Шум резисторів

Подібним методом визначають шумову температуру за більшої кількості з'єднаних в одну схему опорів чи провідностей. Для  $n$  послідовно з'єднаних опорів:

$$T_{ш\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i R_i}{\sum_{i=1}^n R_i},$$

а для  $n$  паралельно з'єднаних провідностей

$$T_{ш\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i g_i}{\sum_{i=1}^n g_i}.$$



## Шум резисторів

Інакше кажучи, шумовою температурою послідовно з'єднаних опорів (чи паралельно з'єднаних провідностей) з різними температурами називають ту температуру, до якої потрібно нагріти кожен опір (провідність), щоб при цьому діюче значення їхньої сумарної шумової напруги (струму) дорівнювало діючому значенню сумарної шумової напруги (струму) за їхніх реальних температур.

Поряд з поняттям шумової температури використовують поняття **відносної шумової температури**  $t_{ш}$  – це відношення шумової температури до стандартної (нормальної) температури  $T_n$  :

$$t_{ш} = \frac{T_{ш}}{T_n}$$

Відносна шумова температура фактично відображає додаткове нагрівання опору під впливом внутрішнього руху електронів.

## Шум коливального контуру

У коливальному контурі шумить лише резистивний опір втрат, реактивні опори не шумлять. У приймачах найчастіше використовують паралельні коливальні контури.

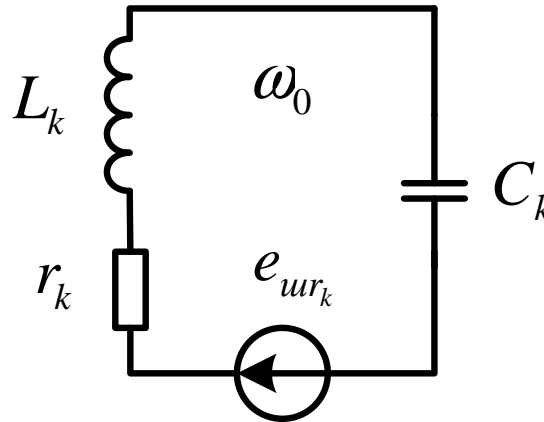


Схема заміщення шумівного коливального контуру

Поблизу резонансної частоти опір втрат  $r_k$  збільшується на контурі у  $Q_k$  раз,  $Q_k = \omega L_k / r_k = 2\pi f L_k / r_k$  - добротність контуру.

## Шум коливального контуру

Оскільки частотний коефіцієнт передачі такої схеми містить лише один полюс, то у цьому випадку співвідношення між його шумовою смугою та смугою пропускання на рівні 0,707 становить

$$\frac{\Delta f_{ef}}{f_{zp}} = 1,57$$

Тоді середній квадрат ЕРС шуму на контурі:

$$E_{uk} = \overline{e_{uk}^2} \approx Q_k^2 \overline{e_{ur_k}^2} = Q_k^2 4kT \Delta f_{ef} r_k = 4kT \Delta f_{ef} r_r$$

За нормальної температури  $T = T_n = 300 \text{ К}$  :

$$E_{uk} [\text{мкВ}] = \sqrt{\overline{e_{uk}^2}} \approx (1/8) \sqrt{r_r [\text{кОм}] \Delta f_{ef} [\text{кГц}]}$$

Тут  $r_r = \omega_0^2 L_k^2 / r_k$  - резонансний опір контуру.

Аналіз показує, що з допустимою в інженерній практиці похибкою для різних багатокаскадних селективних підсилювачів можна використовувати співвідношення

$$\frac{\Delta f_{ef}}{f_{zp}} \approx 1,11.$$

## Шум приймальної антени

**Шум антени обумовлено її опором втрат  $R_{los}$  і шумом, який приймає антена з навколишнього середовища** (земної поверхні, атмосфери та космосу).

Теплові шуми опору втрат антени можна оцінити так:

$$E_{uA} = \overline{e_{uA}^2} = 4kTR_{los} \Delta f_{ef},$$

За значення температури у цьому виразі приймають температуру навколишнього середовища антени.

При оцінюванні шуму, який приймає антена зовні, вважають, що шумить опір випромінювання а рівень прийнятого шуму характеризують шумовою температурою антени, яка залежить від розташування у просторі головної та бічних пелюсток її діаграми напрямленості, від діапазону робочих частот. Наприклад, якщо рівень бічних пелюсток малий, то при спрямуванні антени у зеніт, у напрямі відсутності локальних джерел космічних завад, шумова температура антени  $T_{\Sigma} = 4...10$  К, при спрямуванні на Землю  $T_{\Sigma} \approx 300$  К.

## Шум приймальної антени

**Шумова температура опору випромінювання антени  $T_{\Sigma}$**  - це температура, до якої потрібно опір, рівний опору випромінювання антени, щоб його шуми дорівнювали шумам, які виникають у приймальній антені внаслідок прийому зовнішніх шумових випромінювань.

Результуючий середній квадрат шумової напруги визначатиметься виразом:

$$E_{uA} = \overline{e_{uA}^2} = 4k\Delta f_{ef} (T_{\Sigma} R_{\Sigma} + T_{навк} R_{los}) =$$
$$= \left[ T_{ef} = \frac{R_{\Sigma}}{R_A} T_{\Sigma} + \frac{R_{los}}{R_A} T_{навк}; R_A = R_{\Sigma} + R_{los} \right] = 4k\Delta f_{ef} T_{ef} R_A$$

Тут  $R_A = R_{\Sigma} + R_{los}$  - повний активний опір антени;

$$T_{ef} = \frac{R_{\Sigma}}{R_A} T_{\Sigma} + \frac{R_{los}}{R_A} T_{навк} - \text{ефективна (шумова) температура антени.}$$

У частинному випадку  $T_{навк} R_{los} \ll T_{\Sigma} R_{\Sigma} \Rightarrow E_{uA} = \overline{e_{uA}^2} \approx 4k\Delta f_{ef} T_{\Sigma} R_{\Sigma}$ .

## Шум приймальної антени

### Властивості шумової температури антени:

- внутрішні шуми антени впливають на прийом сигналів тим менше, чим більший ККД антени та менша її фізична температура;
- температура зовнішніх шумів тим більша, чим потужніші джерела зовнішніх шумів, прийнятих антеною;
- на значення температури зовнішніх шумів впливає просторове спрямування антени;
- на відміну від внутрішніх, зовнішні шуми тим менше піднімають еквівалентну температуру антени, чим менший її ККД. З цієї ж причини на низьких радіочастотах, де великі зовнішні завади, ускладнювати приймальну антену з метою збільшення її ККД нераціонально: у таких умовах рівні сигналу та завади зменшуються однаково (пропорційно до ККД антени) і відношення сигнал/завада залишається без змін. У діапазоні ж НВЧ, де рівень зовнішніх шумів значно менший за рівень внутрішніх шумів антени, ККД приймальної антени бажано робити максимально можливим;
- до шумів антени, підсилюваних приймачем, додаються його власні шуми.

## Шум біполярних і польових транзисторів

Шум р-п-переходу спричиняється трьома факторами: резистивним опором шарів р-п-переходу – тепловий шум; нерівномірністю потоку носіїв зарядів через р-п-перехід – дробовий шум; макропроцесами на поверхні шарів р-п-переходу, які створюють шум мерехтіння – флікер-шум.

У дробового шуму спектральна густина рівномірна приблизно до частоти  $0,5 \cdot 10^{11}$  Гц, потім вона спадає, оскільки дробовий шум обумовлений випадковою послідовністю імпульсів струму, створюваних прольотом носіїв заряду, час якого (тривалість імпульсів) становить приблизно  $10^{-11}$  с. Спектральна густина теплового шуму рівномірна до частоти  $3 \cdot 10^{12}$  Гц. Флікер-шум активно впливає на частотах до 10 кГц, тому при цьому аналізі його не враховують.

**Основні причини появи шумів біполярного транзистора (у радіодіапазоні):**

- теплові шуми розподілу активних опорів бази, емітера та колектора (на еквівалентній схемі враховують шляхом введення шумового опору);
- Флуктуації емітерного та колекторного струмів (дробові шуми) (на еквівалентній схемі враховують шляхом введення шумового опору);

## Шум біполярних і польових транзисторів

- перерозподіл струмів між електродами транзистора (на еквівалентній схемі враховуюють шляхом введення відносної шумової температури вхідної провідності).

### Рівень шуму біполярного транзистора можна зменшити шляхом:

- зменшення струмів колектора  $i_c$ , відповідно, бази, без суттєвого зменшення  $h_{21}$ ;
- вибору транзисторів з високою граничною частотою та малим опором бази;
- узгодженням за шумом: оптимальним вибором приведенного до входу транзистора опору джерела сигналу.

### Основні причини появи шумів польового транзистора (з р-n-переходом та на МДН-структурах):

- тепловий шум у струмопровідному каналі;
- дробовий шум затвору;
- тепловий шум вхідної провідності.



## Шум біполярних і польових транзисторів

З цих складових домінує тепловий шум у струмопровідному каналі. Також на практиці враховують тепловий шум вхідної провідності, а дробовий шум затвору настільки малий, що ним нехтують.

Основним способом зменшення шуму польового транзистора є узгодженням за шумом – оптимальний вибір приведенного до входу транзистора опору джерела сигналу.

У цілому, шум польових транзисторів менший за шум біполярних транзисторів.

## Шум діодів

### Складовими шуму діодів є:

- тепловий шум резистивного опору  $r_{pn}$  шарів р-п-переходу;
- дробовий шум струму діода  $i_{nd}$  :

$$\overline{e_{ndh}^2} = 4kTr_{pn}\Delta f_{ef}; \quad \overline{i_{nd}^2} = 2qI_d\Delta f_{ef}.$$

тут  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд електрона,  $I_d$  – струм діода.

Щодо шуму варикапів (напівпровідникових діодів, ємністю р-п-переходів яких керують, змінюючи зворотну напругу), то зворотний струм варикапа доволі малий, тому його дробовий шум також доволі малий. Малим також є і тепловий шум, оскільки  $r_{pn}$  малий.

## **Чутливість приймача**

## Чутливість приймача

Шумові характеристики приймача оцінюють його чутливістю за відсутності зовнішніх завад, тобто вважаючи  $T_{\Sigma} = 0$ .

**Порогова чутливість приймача** – це мінімальна потужність сигналу, підведена до його входу, яка обумовлює заданий рівень сигналу на виході при співвідношенні

$$S/N_{\text{вих.власн}} = \gamma_{\text{out}} = 1,$$

де  $\gamma_{\text{out}}$  – коефіцієнт розрізнюваності.

**Реальну чутливість приймача  $P_{\text{ш}}$  (чутливість приймача, обмежена власним шумом)** визначають аналогічно пороговій, але при співвідношенні  $S/N_{\text{вих.власн}} = \gamma_{\text{out}} > 1$ , та заданному рівні корисного сигналу на виході. Іншими словами, *реальну чутливість характеризують тією мінімальною потужністю корисного сигналу в антені (чи її еквіваленті), при якій на виході високочастотного тракту (лінійної частини) забезпечується задане співвідношення  $S/N$ .*

Коефіцієнт розрізнюваності  $\gamma_{\text{out}}$  вибирають залежно від отримувача повідомлень, призначення та кінцевих пристроїв приймача.

## Чутливість приймача

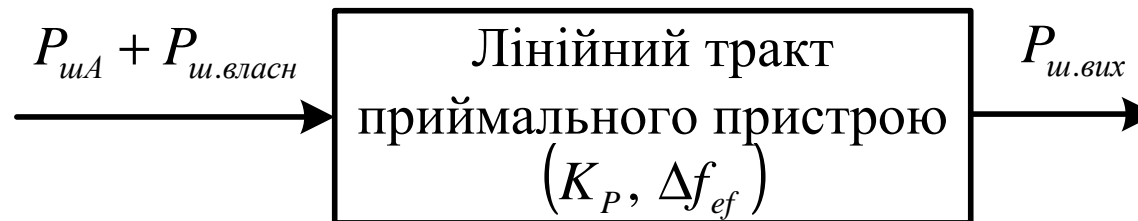
Вираження чутливості  $P_{ш}$  через відношення сигнал/шум на виході лінійної частини приймача  $\gamma_{out}$  (його задають за умовами роботи):

$$\gamma_{out} = \frac{P_{с.вих}}{P_{ш.вих}} = \frac{P_{вх} K_P}{P_{ш.вих}}$$

звідси

$$P_{вх} = \gamma_{out} \frac{P_{ш.вих}}{K_P}.$$

Визначимо тепер потужність шуму на виході. Потужність цього шуму визначається шумом антени та приведеним шумом, перерахованим на вхід високочастотного тракту.



Структура потужності шуму на виході лінійної частини приймального тракту

## Чутливість приймача

Тоді

$$P_{ш.вих} = K_P (P_{шA} + P_{ш.власн}),$$

де 
$$P_{шA} = \frac{\overline{e_{шA}^2}}{4R_A} = \frac{4k\Delta f_{ef} T_{ef} R_A}{4R_A} = k\Delta f_{ef} T_{ef},$$

$$P_{ш.власн} = k\Delta f_{ef} T_n (K_{ш} - 1).$$

В результаті маємо:

$$P_{ш.вих} = K_P [k\Delta f_{ef} T_{ef} + k\Delta f_{ef} T_n (K_{ш} - 1)] = K_P k\Delta f_{ef} T_n \left[ \frac{T_{ef}}{T_n} + (K_{ш} - 1) \right]$$

З урахуванням того, що відношення

$$t_{ef} = \frac{T_{ef}}{T_n}$$

має зміст **нормованої ефективної (шумової) температури антени**, то

## Чутливість приймача

$$P_{ш.вих} = K_P k \Delta f_{ef} T_n [t_{ef} + (K_{ш} - 1)]$$

Результуючий **вираз для чутливості** буде такий:

$$P_{вх} = \gamma_{out} k \Delta f_{ef} T_n (t_{ef} + K_{ш} - 1).$$

**Якщо ж ще враховувати втрати фідера, який з'єднує антену з входом приймача, то чутливість приймача визначатиметься виразом:**

$$P_{вх} = \gamma_{out} k \Delta f_{ef} T_n \left( t_{ef} - 1 + \frac{K_{ш}}{K_{PF}} \right).$$

де  $K_{PF}$  - коефіцієнт передачі фідера.

Звідси

$$t_{ef} - 1 + \frac{K_{ш}}{K_{PF}} = \frac{P_{вх}}{\gamma_{out} k \Delta f_{ef} T_n}.$$

## Чутливість приймача

I, навпаки, при заданій чутливості та параметрах антени і фідера, допустимий коефіцієнт шуму:

$$K_{ш.доп} \leq K_{PF} \left( \frac{P_{\text{вх}}}{\gamma_{\text{out}} k \Delta f_{\text{ef}} T_n} - t_{\text{ef}} + 1 \right).$$

Цей вираз вказує на те, що величину  $K_{PF}$  потрібно робити, за можливості, якомога більшою. Тому довжина фідера не може бути великою. Також з цих міркувань перші каскади приймачів НВЧ встановлюють безпосередньо біля антен.



## Висновки

1. Джерелами власних шумів приймального пристрою є всі активні опори (у т. ч. і опори приймальної антени), резонансні кола та електронні прилади. Шуми опорів і резонансних кіл спричинені тепловим рухом електронів. Тому їх називють також тепловими шумами.
2. З великою точністю власні шуми приймача на виході його лінійної частини описуються нормальним законом розподілу.
3. Шумові властивості реальних опорів можна відобразити за допомогою еквівалентних шумових генераторів напруги чи струму. Опори у таких схемах вважають нешумівними.
4. Коли шумівні резистори мають різну температуру, зручно використовувати поняття шумові температури для оцінювання параметрів сумарного еквівалентного генератора. Поряд з поняттям шумової температури широко використовують поняття відносної шумової температури (відносно 300 K).
5. На виході приймальної антени діють теплові шуми опору втрат антени та шуми, які виникають внаслідок прийому шумових випромінювань космосу, атмосфери та Землі.

## Висновки

6. Для оцінювання шумових властивостей чотириполіосників вводять поняття коефіцієнта шуму та шумової температури.
7. Найбільший вплив на коефіцієнт шуму та загальний рівень шуму приймача мають перший каскад і вхідні пасивні кола, з антенним фідером включно.
8. Для підвищення чутливості приймача потрібно якомога більше зменшити втрати у його вхідних елементах (збільшувати ККД фідера та пасивних кіл), збільшувати підсилення першого каскаду, зменшувати шумові температури антени та першого каскаду.
9. У високочутливих приймачах також потрібно зменшувати рівень шуму другого та третього каскадів.
10. Підвищити ККД фідера можна, якщо зменшити його довжину та коефіцієнт послаблення, а також вибираючи належний тип фідера. Для укорочення антенних фідерів вхідні кола та перші каскади підсилення розташовують біля приймальної антени. При цьому зв'язок з наступними каскадами виконують фідером, послаблення якого мало впливає на коефіцієнт шуму, оскільки корисний сигнал підсилено попередніми каскадами.

## Висновки

11. Інтеграція антен, підсилювачів, перетворювачів частоти у єдине ціле призвела до створення антен-підсилювачів (активних антен). Такі антени мають завдяки інтегральному виконанню мають укорочені провідники і, як наслідок, малий коефіцієнт шуму при малих габаритах та решті характеристик. Типовий приклад використання таких антен – антенні решітки.