

# ZGOMOTE SI PERTURBATII

## Cap.2 Tipuri de zgomot

# Zgomotul termic

## Originea

Acest tip de zgomot își are originea în agitația termică a electronilor liberi într-un mediu disipativ (rezistentă), care conduce la aglomerări spontane de purtători la capete.

# Teorema lui Nyquist pentru sisteme liniare

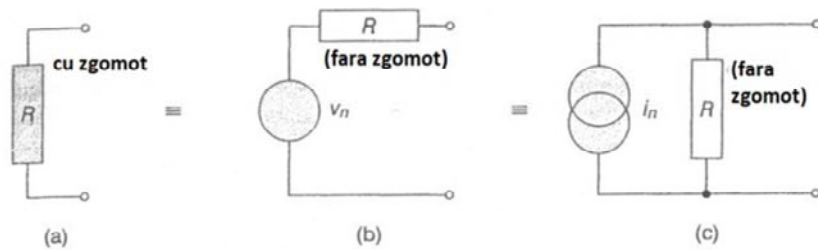


Fig.2.1

$$S(V_n) = \frac{\overline{v_n^2}}{\Delta f} = 4kTR \left[ V^2/Hz \right] \quad (2.1)$$

$$S(I_n) = \frac{\overline{i_n^2}}{\Delta f} = \frac{4kT}{R} = 4kTG \left[ A^2/Hz \right] \quad (2.2)$$

Aceasta teorema stabileste ca fluctuatiile spontane ale tensiunii la bornele (sau ale curentului) unei rezistente liniare R, mentinuta in echilibru termic la temperature T, sunt independente de mecanismele de conductie, de natura materialului, de geometria sau de dimensiunile rezistentei. Aceste fluctuatii depend doar de valoarea rezistentei si de temperature T exprimata in grade Kelvin.

Densitatea spectrala a tensiunii de zgomot in circuit deschis  $v_n$  (care este valoarea patratica medie intr-o banda  $\Delta f$  unitara) este data de relatia (2.1).

Densitatea spectrala a curentului de zgomot in scurtcircuit in (care este valoarea patratica medie intr-o banda  $\Delta f$  unitara) este data de relatia (2.2).

# Generalizari ale teoremei lui Nyquist

- Cazul impedantei arbitrare

$$S(I_n) = 4kT \Re\{Z^{-1}\} = \frac{4kTR}{R^2 + X^2} \quad (2.3)$$

- Cazul mai multor impedante interconectate

$$\overline{v_n^2} = 4kT \int_0^{+\infty} \Re\{Z\} df \quad (2.4)$$

## Cazul impedantei arbitrare

Fie un dipol in echilibru termic, de impedanta  $Z = R + jX$ . Expresia (2.2) devine (2.3).

## Cazul mai multor impedante interconectate

Daca dipolul este constituit din mai multe impedante, curentul sau tensiunea de zgomot la bornele sale poate fi calculate cautind partea reala a impedantei vazuta la borne careia sa i se aplice relatia (2.4). Aceasta se numeste formula lui Nyquist.

## Caracteristici

1. Distribuția spectrală a puterii este uniformă, cel puțin până la frecvențe foarte mari unde corelația cuantică este necesară. În practică se consideră că această limită este atinsă pentru  $f_c = 0.15kT10^{34}$ [Hz].

2. Amplitudinile instantanee ale zgomotului termic au o distribuție normală (gaussiană). Valoarea medie este nulă și valoarea efectivă este rădăcina pătrată din membrul drept al Eq.(2.1) sau (2.2)

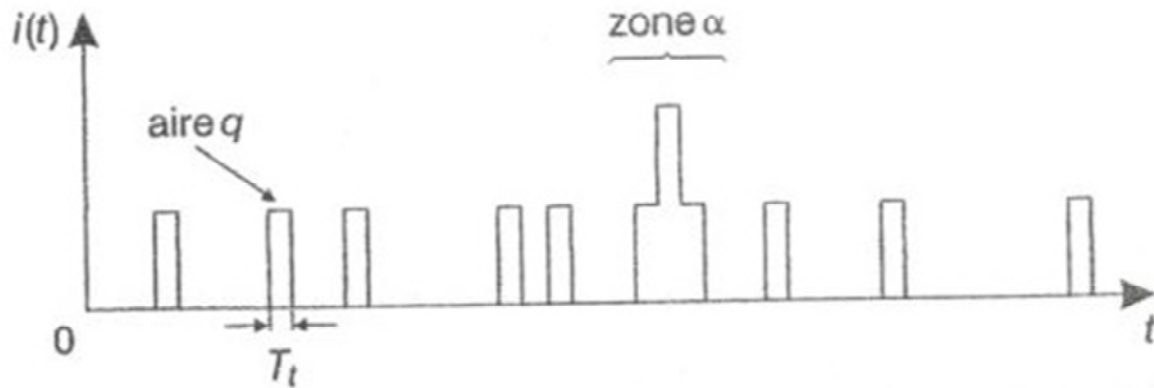
1. Distribuția spectrală a puterii este uniformă, cel puțin până la frecvențe foarte mari unde corelația cuantică este necesară. În practică se consideră că această limită este atinsă pentru  $f_c = 0.15kT10^{34}$ [Hz].
2. Amplitudinile instantanee ale zgomotului termic au o distribuție normală (gaussiană). Valoarea medie este nulă și valoarea efectivă este rădăcina pătrată din membrul drept al Eq.(2.1) sau (2.2)

# Zgomotul de alice

## Originea

Acest zgomot își are originea în natura granulară a curentului electric și în trecerea purtătorilor de sarcină printr-o barieră de potențial.

## Zgomotul de alice



**Fig.2.2**

De fiecare data cind un purtator de sarcina traverseaza o bariera de potential (de exemplu zona depopulate dintr-o jonctiune PN) , apare un impuls elementar de current.. Aceasta situatie este ilustrata in fig.2.2, unde se considera cazul unui current foarte slab produs prin trecerea purtatorilor individuali. In zona alpha, avem un pachet de 4 purtatori din care 2 traverseaza simultan bariera.. Am notat cu  $T_f$  timpul de transit (definit ca timpul necesar purtatorului sa traverseze regiune respectiva). Suprapunind impulsurile elementare datorate unui numar foarte mare de purtatori, valoarea instantanee care va rezulta va fi fluctuanta in jurul valorii sale medii.

## Zgomotul de alice

$$i(t) = q \sum_i \delta(t - t_i) \quad (2.5)$$

$$\overline{i(t)} = I_0 = \lambda q \quad (2.6)$$

$$S(I) = 2qI_0 \left[ A^2 / \text{Hz} \right] \quad (2.7)$$

$$\overline{i_n^2} = 2qI_0 \Delta f \quad (2.8)$$

Curentul instantaneu se poate pune sub forma (2.5), o suma de impulsuri Dirac de marime  $q$ .

Valoarea medie este Eq.(2.6), unde  $\lambda$  este numarul mediu de electroni care trec bariera intr-o secunda.

Densitatea spectrala (unilaterală) de curent de zgomot de alice este Eq.(2.7) (luind in considerare doar frecventele pozitive). Acest spectru este un spectru alb.

Valoarea patratica medie a componentei fluctuante suprapusa peste curentul mediu  $I_0$  este data de teorema lui Schottky, Eq.(2.8)



## Cazul unei jonctiuni PN

$$I = I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.9)$$

$$\overline{i_{n,tot}^2} = \left( 2qI_s \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) + 2qI_s \right) \Delta f = 2q(I + 2I_s) \Delta f \quad (2.10)$$

$$g_m = \frac{dI}{dV} = \frac{qI}{kT} \quad (2.11)$$

$$\overline{i_{n,tot}^2} \simeq 2qI \Delta f = 2kTg_m \Delta f \left[ A^2 \right] \quad (2.12)$$

Curentul intr-o jonctiune PN consta in injectarea de purtatori minoritari prin jonctiune, urmata de difuzia si recombinarea lor.

Curentul total este exprimat sub forma Eq.(2.9) , unde V este tensiunea aplicata si I<sub>s</sub> este curentul de saturatie. Acest current total poate fi considerat ca suma a doi curenti, I<sub>s</sub>\*exp(qV/kT) si respective -I<sub>s</sub>. Plecind de la principiul ca cei doi curenti fluctueaza independent, avem Eq.(2.10).

Conductanta diferentia la joasa frecventa este data de Eq.(2.11), ceea ce permite , in cazul unei jonctiuni polarizate direct, sa se dea o relatie aproximativa a Eq.(2.10) sub forma Eq.(2.12).

Expresia (2.12) comparata cu relatia (2.2), arata ca zgomotul de alicie al unei jonctiuni PN, polariata direct, este egal cu jumatate din zgomotul termic generat de o rezistenta echivalenta cu rezistenta diferentia.

## Cazul unei jonctiuni metal- semiconductor

$$S(I_{tot}) = 2q(I + 2I_S) \quad (2.13)$$

$$S(I_{tot}) = 2kTg_m \frac{(I + 2I_S)}{I + I_S} \quad (2.14)$$

In cazul acestei jonctiuni, avem doua tipuri de purtatori:

- 1) Purtatorii care vin din metal in semiconductor si care trebuie sa treaca peste o bariera de potential de inaltime  $E_0$ , de unde un current  $-I_S$  care depinde foarte putin de tensiunea aplicata  $V$ .
- 2) Purtatorii care vin din semiconductor spre metal, care intilnesc o bariera de potential  $q(\phi_c - V)$ , unde  $\phi_c$  este potentialul de contact. Se poate arata ca acest current, notat  $I$ , este proportional cu  $\exp(qV/kT)$ .

Curentul total fiind suma acestor doi curenti, densitatea spectrala de current de zgomot total este Eq.(2.13).

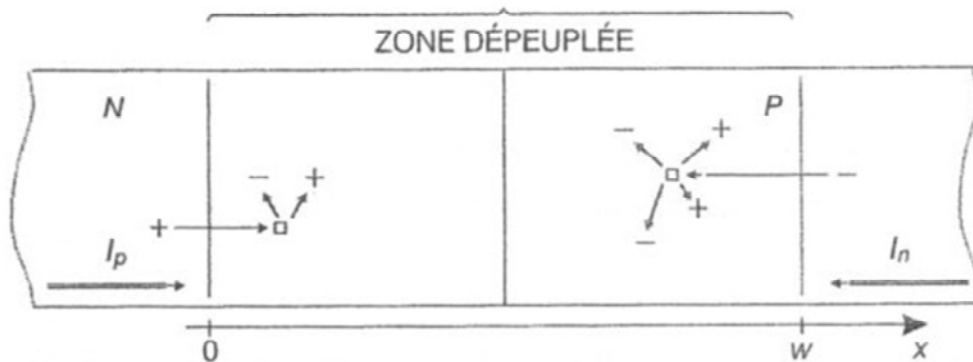
Folosind conductanta diferentiala  $g_m$ , obtinem Eq.(2.14).

# Zgomotul de avalansa

## Originea

Acest zgomot este legat de multiplicarea prin avalansa a purtatorilor intr-o jonctiune PN polarizata invers.

## Zgomotul de avalansa



**Fig.2.3**

Cind o tensiune inversa aplicata creste spre valoarea de strapungere, cimpul electric devine din ce in ce mai intens. Sub influenta lui, purtatorii de sarcina minoritari (electronii in materialul P si golurile in materialul N) sunt accelerate si capata suficienta energie pentru a genera una sau mai multe perechi electron-gol la fiecare coliziune cu nodurile retelei cristaline (fig.2.3).

## Zgomotul de avalansa

$$\overline{i^2} = 2qI_0 \overline{M^2} \Delta f \quad (2.15)$$

$$S(I) = 2qI_0 \overline{M^2} \left[ A^2 / \text{Hz} \right] \quad (2.16)$$

$$I_0 = I_p(0) + I_n(w) + qA \int_0^w g(x) dx \quad (2.17)$$

In cazul purtatorilor generate prin avalansa, zgomotul asociat trecerii lor este mult mai complex, deoarece factorul de multiplicare M a purtatorilor este o variabila aleatoare de distanta (vezi fig.2.3) si timp. Mai mult, probabilitatea de a genera prin impact alti purtatori nu este aceeași pentru electroni si pentru goluri.

Totusi, presupunind ca M este independent de x, expresia curentului de zgomot de avalansa este (2.15), ceea ce conduce la densitatea spectrala de current (2.16), unde  $I_0$  este dat de (2.17). In aceasta relatie,  $I_p(0)$  reprezinta curentul de goluri la  $x = 0$ ,  $I_n(w)$  reprezinta curentul de electroni la  $x = w$ ,  $g(x)$  este numarul de perechi electron-gol generate in punctul x, in volumul unitary si in timp de o secunda, iar A este aria setiunii structurii.

Acest zgomot afecteaza mai ales diodele Zener. El este un zgomot de tip "zgomot alb".