

Elektromos zajok

Átlagérték, négyzetes átlag, effektív érték

Átlagérték

Időben változó jel átlagértéke alatt a jel idő szerinti integráljának és a közben eltelt időnek a hányadosát értik:

$$\bar{i} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} i dt$$

Négyzetes átlag

A jel négyzetének az átlaga:

$$\overline{i^2} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} i^2 dt$$

Áramok és feszültségek esetében ez az érték arányos a teljesítménnyel. A pillanatnyi teljesítmény:

$$P(t) = [i(t)]^2 R$$

ahol $i(t)$ az áram pillanatnyi értéke, R az ellenállás.

Innen az átlagos teljesítmény:

$$\bar{P} = \overline{i^2} R$$

Effektív érték

Az azonos teljesítményt létrehozó egyenáram vagy egyenfeszültség értéke:

$$P=I^2R=U^2/R$$

A teljesítmények azonosságából következik, hogy az effektív érték a négyzetes átlag négyzetgyöke:

$$P=\bar{P}$$

$$I^2R=\bar{i^2}R$$

$$I = \sqrt{\bar{i^2}}$$

Hasonló módon a feszültség esetében:

$$U = \sqrt{\bar{u^2}}$$

Az átlagolást időben nem szabályosan változó jelek esetében végtelen hosszú időtartamra kell végezni. Gyakorlatban olyan hosszú időtartamot kell választani, amikor az átlagérték már nem függ az időtartam hosszától. Periodikus jelek esetében elegendő egy periodusra átlagolni.

Szinuszos jel átlagértékei

Az áram:

$$i(t) = I_0 \sin \omega t$$

Az áram négyzete:

$$i^2(t) = I_0^2 \sin^2 \omega t$$

A trigonometriából ismert:

$$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t)$$

Behelyettesítve:

$$i^2(t) = \frac{I_0^2}{2} (1 - \cos 2\omega t)$$

Az áram átlaga:

$$\bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^T I_0 \sin \omega t dt = \frac{I_0}{\omega T} (\cos \omega T - \cos 0) = 0$$

Az áram négyzetes átlaga:

$$\overline{i^2} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{I_0^2}{2} (1 - \cos 2\omega t) dt = \frac{I_0^2}{2T} [(T - 0) - \frac{1}{2\omega} (\sin 2\omega T - \sin 0)] = \frac{I_0^2}{2}$$

Az effektív érték:

$$I = (\overline{i^2})^{1/2} = I_0 / \sqrt{2}$$

Periodikus fűrészfjel átlagértékei

Az áram 0 és T idő között:

$$i(t) = I_0 \frac{t}{T}$$

Az áram négyzete 0 és T idő között:

$$i^2(t) = I_0^2 \frac{t^2}{T^2}$$

Az áram átlaga:

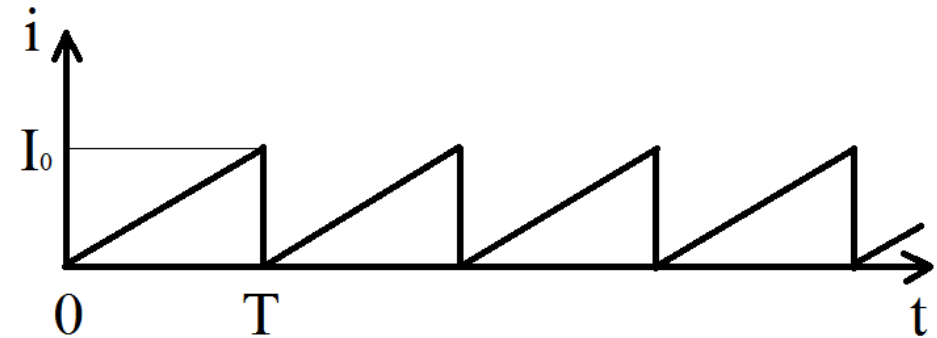
$$\bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^T I_0 \frac{t}{T} dt = \frac{I_0}{T^2} \frac{T^2}{2} = \frac{I_0}{2}$$

Az áram négyzetes átlaga:

$$\overline{i^2} = \frac{1}{T} \int_0^T I_0^2 \frac{t^2}{T^2} dt = \frac{I_0^2}{T^3} \frac{T^3}{3} = \frac{I_0^2}{3}$$

Az effektív érték:

$$I = (\overline{i^2})^{1/2} = I_0 / \sqrt{3}$$



Elektromos zajok és zavarok

Az áramkörök kimenetén mindig vannak zavaró jelek:

- külső zavarok (áthallás, brumm, kozmikus, stb.): elvileg kiküszöbölhetők.
- az áramkörben keletkező zajok: nem küszöbölhetők ki.
- nullhiba (offset): egyenáramú erősítők esetében.

Zaj

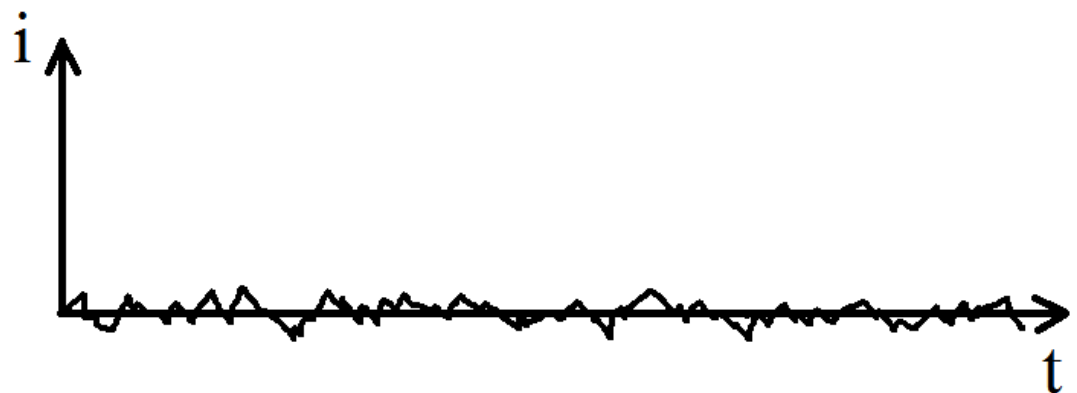
Véletlenszerű áram és feszültség fluktuációk: sztohasztikus jel (nagyon széles a spektruma: $f=0 \rightarrow \infty$).

A zajfeszültség és zajáram átlagértéke zérus, de a négyzetes átlaguk nagyobb nullánál: a zajnak van teljesítménye, ezt érzékeljük.

Nem perpetuum mobile, a zaj energiája a betáplált energiából származik.

Az elektromos zajokat az őket létrehozó okok szerint osztályozzák:

- termikus zaj,
- sörétzaj,
- villódzási zaj,
- lavinazaj,
- árameloszlási zaj és
- négyszögzaj.



Termikus zaj (Johnson zaj, Nyquist zaj, ellenállászaj, hőzaj)

A töltéshordozók hőmozgásának a következménye. A vezető egy adott helyén adott időtartam alatt ellentétes irányban áthaladó hőmozgást végző töltéshordozók száma nem nulla, csak az átlagértékük nulla: zajáram. Mivel a vezetőnek van ellenállása, azon a zajáram zajfeszültséget hoz létre. Csak ohmos ellenállással rendelkező alkatrészekben jön létre. (Reaktáns elemekben a veszteségi ellenálláson.)

A termikus zajfeszültség négyzetes átlaga:

$$\overline{u_{tz}^2} = 4kTR\Delta f$$

ahol k a Boltzmann állandó ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K),
 T a(z abszolút) hőmérséklet, R az ellenállás,
 Δf a sáv szélesség, amelyben vizsgáljuk a zajt.

A zajteljesítmény:

$$P_{tz} = \overline{u_{tz}^2} / R = \overline{i_{tz}^2} R$$

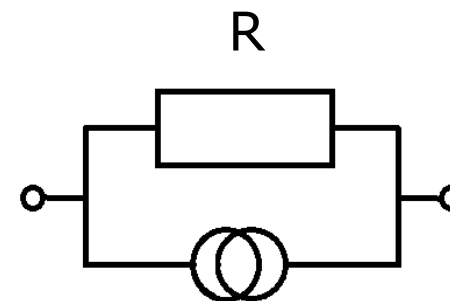
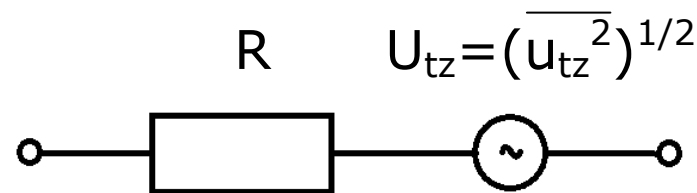
Innen a zajáram:

$$\overline{i_{tz}^2} = 4kT\Delta f / R$$

A leadható maximális zajteljesítmény
illesztett terhelés esetén ($R_t = R$):

$$P_{tzmax} = \overline{u_{tz}^2} / 4R = \overline{i_{tz}^2} R / 4 = kT\Delta f$$

Helyettesítő kapcsolások:



A zajteljesítmény nem függ a frekvenciától (fehér zaj) és az ellenállás értékétől.

Sörétzaj

Potenciállépcsőn (p-n átmenet, kvantumdióda, stb.) áthaladó töltéshordozók száma időben fluktuál (változik): a töltés kvantumokban (elemi töltés egységként) áramlik.

$$\overline{i_{sz}^2} = 2qI\Delta f$$

ahol q az elemi töltés, I az átfolyó áram.

Figyelembe vételére áramgenerátoros helyettesítő kapcsolást használnak.

Villódzási zaj (flickerzaj, 1/f zaj)

Főleg félvezetőkben, a felületi csapdák hatása.

$$\overline{i_{vz}^2} = C_1 I^\beta \Delta f / f^\alpha$$

ahol a C_1 konstans a technológia függvénye, $\beta \approx 2$ (0,5-2), $\alpha \approx 1$ (1-2).

Lavinazaj

Sörétzajhoz hasonló, a lavinafolyamat okozza.

$$\overline{i_{lz}^2} = C_2 I \Delta f$$

Árameloszlási zaj

Elágazásnál (tranzisztor emitter árama, többrácsos csövek) az áram megoszlása az egyes ágak között időben fluktuál.

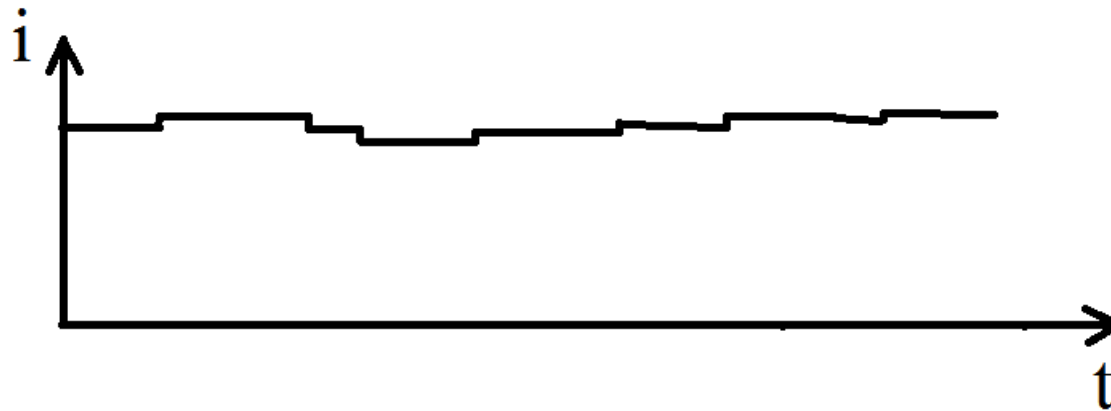
Tranzisztorban:

$$\overline{i_{\text{áz}}^2} = 2qI_B\Delta f$$

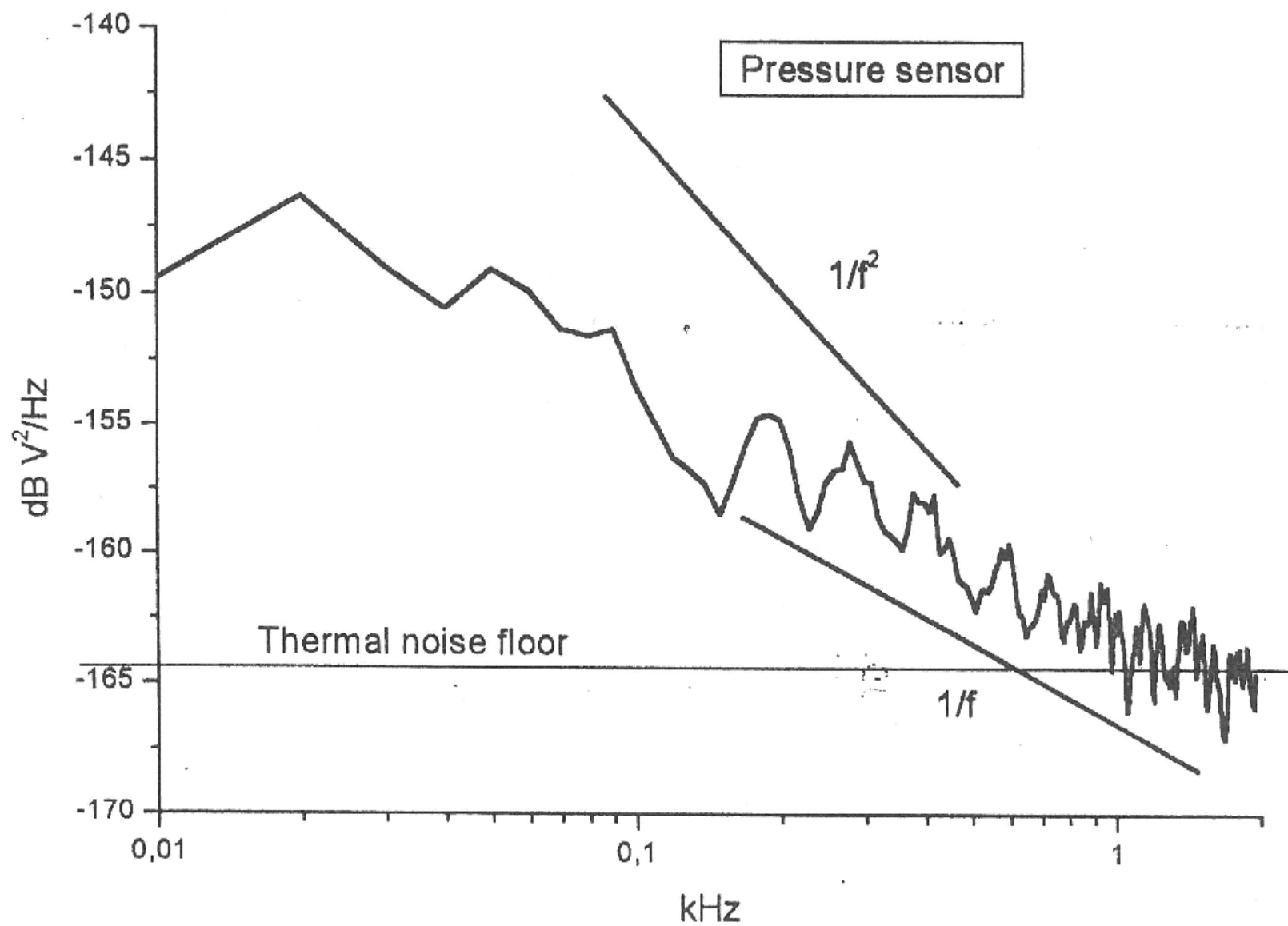
ahol I_B a bázisáram.

Négyszögzaj

Főleg aktív félvezető eszközökben: kisfrekvenciás, ugrás alakú jel.



Kísérleti eredmény



Egy, az MTA MFA-ban készült nyomá szenzor zajspektruma

Zajfajták az alkatrészekben

Ellenállások

Termikus zaj, $1/f$ zaj

Reaktáns passzív elemek (C, L)

Nem termelnek zajt, csak a valós összetevőjük (termikus zajt).

Diódák

Sörétzaj, termikus zaj, villódzási zaj, négyszög zaj.

Zener és lavinadiódáknál a lavinazaj dominál.

Tranzisztorok

Sörétzaj, termikus zaj, villódzási zaj, eloszlási zaj, négyszög zaj.

Zajjellemzők

Jel/zaj viszony

A jel és a zaj teljesítményének (a négyzetes átlagoknak) a hányadosa.

Egyenértékű zajellenállás

Az az ellenállás érték, amekkora ellenálláson az adott zajteljesítménynek megfelelő nagyságú termikus zaj jönne létre az adott hőmérsékleten. A termikus zaj zajfeszültségének kifejezése alapján:

$$R_e = \overline{u_{tz}^2} / 4kT\Delta f$$

Zajhőmérséklet

Az a hőmérséklet, amelyen az adott zajteljesítménynek megfelelő nagyságú termikus zaj jönne létre az adott ellenálláson. A termikus zaj zajfeszültségének kifejezése alapján:

$$T_z = \overline{u_{tz}^2} / 4kR\Delta f$$

Zajtényező (noise figure)

$$F = 20 \lg \frac{\text{jel / zaj}_{\text{bemeneti}}}{\text{jel / zaj}_{\text{kimeneti}}} \text{ dB}$$

$$F = 10 \lg \frac{\overline{u_z^2}_{\text{ki valós}}}{\overline{u_z^2}_{\text{ki zajmentes}}} \text{ dB}$$

Az áramkör által hozzáadott zajra jellemző.

Ellenőrző kérdések

- 1., Mi a különbség az átlag és a négyzetes átlag között?
- 2., Mi az effektív érték?
- 3., Milyen hosszú időtartamra kell végezni az átlagolást?
- 4., Milyen jelforma esetén lesz az effektív érték az amplitúdó gyököttes része?
- 5., Milyen külső zavarok jelenhetnek egy áramkör kimenetén?
- 6., Mi a zaj?
- 7., Mit jelent a „fehér zaj” kifejezés?
- 8., Milyen zajfajtákat ismer?
- 9., Mi okozza az ellenállászajt?
- 10., Mi okozza a sörétzajt?
- 11., Milyen a villódzási zaj spektruma?
- 12., Melyik alkatrészekben jelentős a lavinazaj?
- 13., Hol lép fel árameloszlási zaj?
- 14., Milyen a négyszögzaj spektruma?
- 15., Milyen zajfajták vannak a reaktáns passzív elemekben?
- 16., Milyen zajfajták vannak a tranzistorokban?
- 17., Mi az egyenértékű zajellenállás?

18., Mi a zajhőmérséklet?

19., Mi a zajtényező?

20., Mi a jel/zaj viszony?