

ZGOMOTUL ELECTRONIC AL FILTRELOR NUMERICE

Valentin GUȚU

Universitatea Tehnică a Moldovei

Abstract: Lucrarea prezintă o analiză comparativă a dispozitivelor de selecție a semnalelor prin frecvență, analogice și numerice, din punctul de vedere al zgomotului electronic propriu. Se trage concluzia că filtrele numerice, asigurând un grad mai înalt de stabilitate funcțională contra perturbațiilor exterioare (câmpuri electrostatice și magnetice, descărcări electrice, interferențe și bruiaj, etc.) posedă un nivel considerabil de zgomot propriu; acesta depășește (de zeci de ori) nivelul zgomotului propriu al filtrelor tradiționale analogice active de tip *RC*. Pentru o bună funcționare filtrele numerice necesită un raport *semnal/zgomot* mult mai avansat.

Cuvinte cheie: : filtru, analog, digital, frecvență, zgomot electronic propriu

1. Introducere

În procesarea datelor și prelucrarea informației un rol important aparține *filtrației semnalelor* prin frecvență – operație, realizată cu dispozitive și circuite analogice (filtre pasive sau active) sau cu dispozitive și circuite logice și în acest caz numindu-se *filtrație numerică* a semnalelor.

Se poate constata faptul că la ora actuală, atât filtrării analogice cât și filtrării numerice le sunt dedicate o mulțime enormă de lucrări și publicații, cu caracter general-cognitiv și de profil. Din punct de vedere cronologic însă, filtrarea numerică este ceva „mai tânără”, dar nu atât de categoric: printre primele publicații dedicate filtrării numerice pot fi considerate lucrările, apărute în anii 1968 – 1973 în IEEE ale autorilor A. Oppenheim, R. Schafer și a.

Spre deosebire de filtrele analogice (pasive sau active) în care semnalul este prelucrat în forma sa reală și netransformată, filtrele numerice prezintă sisteme de prelucrare a spectrului semnalelor, reprezentate prin *secvențe de numere*, luate la intervale *discrete* de timp. Aceste filtre utilizează circuite logice, iar prelucrarea semnalelor se face *liniar* având ca rezultat schimbarea *formei semnalului* de intrare al filtrului digital, de altfel – ca și în cazul celui analogic.

Mai multe rațiuni stau la baza tendinței utilizării microprocesoarelor în realizarea filtrelor numerice, în special a celor care funcționează în timp real:

- dimensiuni mici și un grad înalt de fiabilitate;
- flexibilitate și eficacitate ridicată a filtrelor numerice realizate;
- contribuie la utilizarea tot mai largă a sistemelor numerice de comunicație și transfer de date.

Ușor de observat că la ora actuală are loc o intersectare și influență tot mai profundă și efectivă a teoriei clasice a filtrelor (active, în primul rând) și a „computer science”-ului. Să vedem însă, cât de performante sunt filtrele numerice, din punct de vedere al *zgomotului electronic propriu*.

2. Comparație funcțională: filtre analogice – filtre numerice

Din teoria circuitelor liniare analogice este cunoscut că selecția semnalelor prin frecvență poate fi realizată cu ajutorul circuitelor simple, ce conțin elemente pasive, *L* – inductanțe și *C* – condensatoare. Se știe bine de asemenea că teoria și practica sintezei filtrelor pasive *LC* este suficient de bine pusă la punct. Teoretic există posibilitatea înlocuirii inductanței *L* cu o rezistență, *R*. Un astfel de circuit pasiv *RC* poate realiza o funcție de transfer dependentă de frecvență, adică a unui filtru analogic. Doar că caracteristica unui astfel de filtru (figura 1) este insatisfăcătoare: posedă un factor de calitate *Q* foarte mic ($Q \approx 1$) din cauza pierderilor de semnal [1]. Pentru acest circuit, în conformitate cu teorema lui Kirchoff se poate scrie o ecuație diferențială de ordinul 1, fiind elementele *R* și *C* parcurse de curentul *i*:

$$Ri + u_C = u_1 \quad (1)$$

sau

$$Ri + \frac{1}{C} \int idt = u_1. \quad (2)$$

Efectuând transformările de rigoare și ținând cont că $u_C = u_2$, se poate scrie:

$$\frac{1}{RC} \frac{du_2}{dt} + u_2 = u_1. \quad (3)$$

În cazul că semnalul de intrare u_1 este un salt treaptă unitară, semnalul de ieșire u_2 va fi alcătuit din două componente: cea forțată și cea liberă (exponențială), adică

$$u_2 = 1 - e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (4)$$

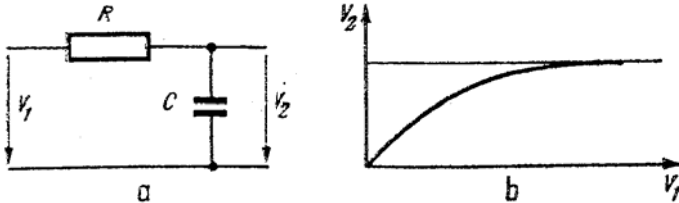


Fig.1. Filtru pasiv RC.

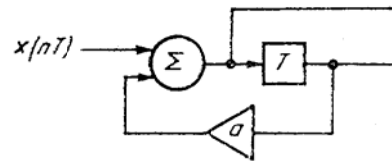


Fig. 2. Filtru numeric.

În sistemele numerice în general variabilele nu sunt continue, ele sunt determinate la intervale discrete de timp, acestea fiind egale între ele, notându-se cu T . Din figura 2 sunt clare operațiile ce se efectuează: adunarea – cu un element de însumare logică Σ , înmulțirea cu o constantă a , întârzierea cu intervalul de timp T . Mărima intermediară $y_1(nT)$ este egală cu mărimea de ieșire $y(nT)$, dar întârziată cu un interval de timp T , id est

$$y_1(nT) = y[(n-1)T] = y(nT-T). \quad (5)$$

Luând în considerare această relație, pentru circuitul din figura 2 putem scrie:

$$y(nT) = x(nT) + a y_1(nT), \quad (6)$$

$$\text{sau } y(nT) = x(nT) + a y(nT-T). \quad (7)$$

Ultima ecuație poate fi prezentată și sub altă formă:

$$a [y(nT) - y(nT-T)] + (1-a)y(nT) = x(nT) \quad (8)$$

$$\text{sau } a \Delta y(nT) + (1-a)y(nT) = x(nT), \quad (9)$$

unde Δ prezintă operatorul diferență, adică

$$\Delta y(nT) = y(nT) - y(nT-T). \quad (10)$$

Expresia (9) bifată reprezintă ecuația cu diferențe finite, de ordinul unu a circuitului din figura 2. Această ecuație poate fi comparată cu ecuația diferențială (3) a circuitului analogic figura 1, are același rol, ambele ecuații sunt liniare și poate fi aplicat principiul superpoziției (mai multe detalii pot fi găsite în lucrarea [4]).

3. Evaluarea filtrelor numerice din punct de vedere al zgomotului electronic propriu

Se poate constata cu certitudine că la ora actuală teoria și practica realizării sistemelor de pre-lucrare numerică a semnalelor a atins nivelul optimal. Sunt de netăgăduit și importante multiplele avantaje ale filtrelor numerice în comparație cu filtrele analogice. Rămâne să ne convingem că și din punctul de vedere al zgomotului electronic propriu, aceste dispozitive sunt în avantaj față de filtrele tradiționale analogice, în primul rând față de filtrele active RC. Doar că tocmai la acest capitol filtrele numerice pierd din teren: ne rămâne să stabilim, dacă este așa și în ce măsură. Dar...ce prezintă zgomotul electronic propriu? Este vorba nu de un zgomot oarecare, apărut de oriunde și care are la origine cele mai diverse surse – perturbații de tot felul și frumusețea, care împiedică captarea, selecția și prelucrarea semnalelor de natură elec-tromagnetică, ca de exemplu: influența câmpurilor electrostatice și magnetice exterioare, descărcări electrice, fonul radioactiv local și cosmic, prezența surselor puternice de lumină etc. Zgomotul electronic propriu are cu totul altă natură, el este o „patologie” a elementelor și dispozitivelor electronice, iar „rădăcinile” lui pornesc din straturile principiilor de funcționare, ale proprietăților fizice și chimice ale materialelor din care sunt construite, a caracterului corpuscular al curentului electric (ca rezultat al deplasării polarizate ale purtătorilor de sarcină). Tocmai aici rezidă diversitatea zgomotului electronic, a condițiilor în care apare și a modului în care se manifestă (v. figurile 4 și 5). Și dacă natura unor tipuri de zgomot electronic, ca de exemplu zgomotul Jonson (sau termic, cu spectrul zgomotului „alb”) este relativ clară, nu se poate afirma același lucru despre zgomotul la frecvențe joase – flicker noise (1/f), zgomotul de alicie – shot noise, zgomotul de explozie (sau pocnitură) – burst noise [1,2], zgomotul frecvențelor înalte natura căruia rămâne în continuare neclară, deși există diverse ipoteze [2]. Este evident din cele expuse mai sus că perturbațiile exterioare dispozitivelor și echipamentelor de selecție a semnalelor prin frecvență pot fi contracarate efectiv, prin ecranare electrostatică și magnetică, prin utilizarea conductorilor de legătură bine ecranați sau folosind „perechi împletite” de

conductori iar carcasele echipamentelor și sursele de alimentare – puse la „masă” sigură, pentru a exclude pătrunderea impulsurilor perturbante prin rețeaua de alimentare. Toate aceste măsuri nu servesc la nimic, dacă este vorba despre *zgomotul electronic propriu* al dispozitivelor și echipamentelor electronice. Pentru că în acest caz zgomotul vine din interiorul dispozitivului și este, vorbind la figurat – o boală a lui. Această „boală” se tot tratează, timp de vreo 60 - 70 de ani, de când au apărut primele dispozitive electronice – diodele cu vid și alte tuburi electronice. Pe parcursul acestor decenii sau dus „lupte crâncene” împotriva zgomotului propriu, în primul rând în echipamentele destinate selecției semnalelor prin frecvență, captării și prelucrării ulterioare a acestor semnale. Sigur, este vorba de semnale de natură electromagnetică, de intensitate sau putere foarte mică (de ordinul μV sau μW) captate de antenele instalațiilor planetare sau cosmice de radio și telecomunicații, sau antenele telescoapelor radio cosmice sau de legătură cu sateliți și nave ce brăzdează spații cosmice și interplanetare (exemplul telescopului spațial Hubble). De la sistemele de captare semnale se cere o sensibilitate extremă care este, firește determinată de nivelul zgomotului propriu – prag, sub care semnalele nu mai pot fi recepționate și deci prelucrate. Iată aici s-a dat – și mai continuă să se dea – bătălia contra zgomotului, propriu în primul rând. În privința acestui tip de zgomot se poate spune că toată lumea înțelege despre ce este vorba, cum arată și cum se manifestă; arată aproximativ ca în figura 4, iar

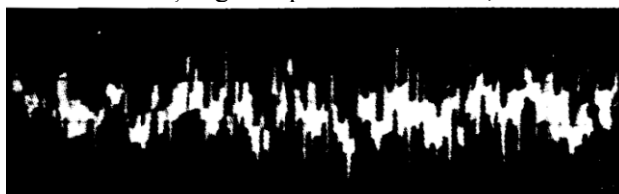


Fig. 4. Zgomotul propriu al unui etaj de amplificare.

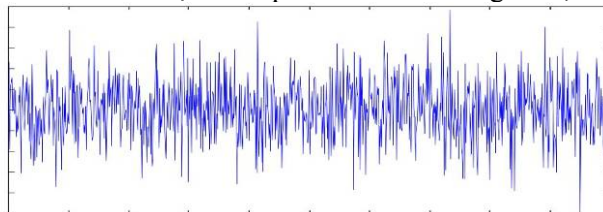


Fig.5. Oscilograma zgomotului „alb”.

modul de manifestare – dacă este vorba despre un aparat radio, în lipsa semnalului util (stația transmițătoare concretă) se aude un foșnet monoton în boxe aparatului. Acest zgomot are un spectru uniform și poartă denumirea de *zgomot alb*. Acest spectru este caracteristic zgomotului termic (Jonson) care apare pe bornele unui rezistor dintr-un circuit electric și care în forma analitică poate fi prezentat ca un generator de tensiune electromotoare $\overline{E_{Z_i}^2}$:

$$\overline{E_{Z_i}^2} = 4 k T r_i \Delta f, \quad (11)$$

unde k este constanta Boltzman; T - temperatura mediului ambiant, $^\circ\text{K}$; r_i - partea activă a unei rezistențe complexe Z_i , Ω ; Δf - banda de frecvențe în care se calculează (sau măsoară) zgomotul.

Tensiunea efectivă a zgomotului unui rezistor cu valoarea $r = 1 \Omega$, în banda de frecvențe $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ la temperatura 20°C este egală cu $0,127 \text{ nV}$. S-ar părea această valoare extrem de mică; să ținem cont însă că valorile reale ale rezistoarelor sunt de mii, zeci de mii de ori mai mari și banda frecvențelor alcătuiește zeci și sute de kHz. De exemplu, în cazul unui rezistor de $10 \text{ k}\Omega$ și o bandă de frecvențe de 10 kHz tensiunea efectivă de zgomot este deja $\approx 1,3 \mu\text{V}$. Se știe că semnalele recepționate de la telescopul spațial Hubble aveau valori între $0,01 \div 0,05 \text{ mV}$, adică doar de 10 ori mai puternice decât nivelul zgomotului unui rezistor! Zgomotul propriu al altor elemente pasive – L și C poate fi ignorat în comparație cu zgomotul rezistoarelor, fiind cu 2-3 ordine mai mic. Interesul major îl prezintă, desigur zgomotul propriu al elementelor active ale circuitelor electronice: diode de toate tipurile, tranzistoarele bipolare și cu efect de câmp (FET) în varianta fabricării ca dispozitive discrete și circuitele integrate (ca produs finit), care în prezent alcătuiesc o gamă funcțională impresionantă: amplificatoare operaționale (de tot felul) și generatoare de semnale, porți logice și circuite basculante, surse de alimentare și stabilizatoare de curenți și tenaiuni, etc.

Este extrem de important de stabilit cum stau lucrurile cu **zgomotul electronic propriu** al dispozitivelor electronice, analogice și digitale. O analiză detaliată a problemei zgomotului electronic al dispozitivelor digitale este dată în [4], în această lucrare este efectuată o evaluare calitativă a zgomotului propriu al filtrelor digitale, comparându-se cu filtre analogice active RC. Se ajunge la concluzia că, deși filtrele numerice permit realizarea oricăror funcții de transfer – trece-jos, trece-sus, trece-bandă și a multor altor, aceste filtre sunt mult mai „zgomotoase”; aceasta se explică prin faptul că realizarea oricărei caracteristici și funcții de transfer se obține cu un număr mult mai mare de elemente active - amplificatoare operaționale, în primul rând. Prin urmare, filtrele numerice pot fi utilizate în sisteme cu semnale bine determinate și suficient de puternice, când zgomotul propriu al zecilor și sutelor de elemente active și pasive nu influențează funcționarea corectă a dispozitivelor și echipamentelor, în ansamblu. Deci, filtrele numerice pot fi utilizate oriunde, cu excepția etajelor primare ale instalațiilor de captare și prelucrare a semnalelor de mică putere (zecimi de μW), care se pot „pierde” în zgomotul propriu al acestor instalații.

Deși filtrele numerice convertesc semnalul analogic în cod numeric, obținându-se astfel o siguranță avansată și certă independență de tot felul de perturbații exterioare (câmpuri electrostatice și magnetice, descărcări electrice, perturbații prin rețeaua de alimentare etc.), zgomotul propriu își lasă amprenta asupra calității rezultatului final – imagini în cazul emisiunilor televizate (figura 6), voce și fragmente muzicale în cazul legăturilor radio, telecomunicații și telefonie mobilă (figura 7). Zgomotul propriu se suprapune pe semnalul util și apare necesitatea de „curățare” a acestuia, ceea ce nu totdeauna se reușește cu mijloace simple – în tendința micșorării zgomotului este semnificativ atenuat...semnalul util.

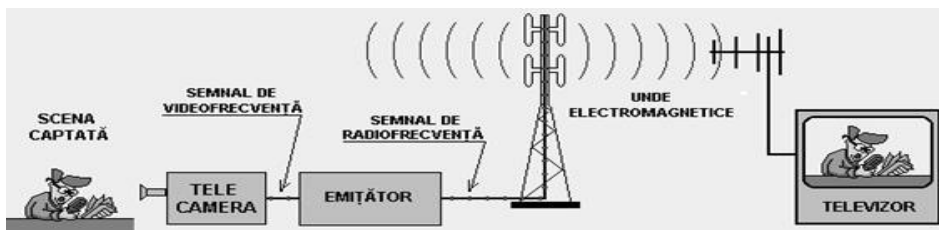


Fig.6.

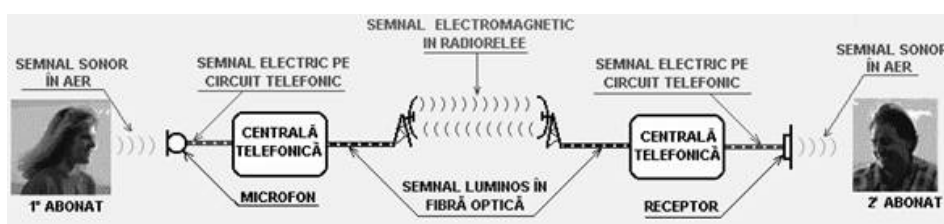


Fig.7.

4.Concluzii

1. În procesul de prelucrare a informației un rol deosebit de important revine selecției semnalelor (prin frecvență). Aceasta se poate face fie analogic utilizând circuite oscilante $R-L-C$, sau numeric cu circuite logice (filtre numerice).

2. Filtrele numerice posedă avantaje față de cele analogice (inclusiv și filtrele active RC) - caracteristici precise și stabile, dimensiuni mici, nu se cere adaptarea de impedanțe și – foarte important – o flexibilitate remarcabilă: tipul filtrului poate fi modificat printr-o simplă schimbare de coeficienți (proprii).

3. Analiza comparativă a filtrelor numerice și a filtrelor active RC pune în evidență o particularitate deosebită a filtrelor numerice: redundanța, *id est* numărul excesiv de elemente active al circuitelor logice utilizate pentru realizarea funcțiilor de transfer *trece-jos*, *trece-sus* și *trece-bandă*. Elementele active (tranzistoarele bipolare sau cu efect de câmp, discrete sau integrate) prezintă sursa principală de *zgomot electronic propriu* al dispozitivelor și echipamentelor. Deci, din acest punct de vedere filtrele numerice nu sunt ireproșabile: nivelul de zgomot propriu depășește zgomotul propriu al filtrelor active RC analoage de zeci sau și sute de ori.

4. Filtrele numerice nu sunt influențate de tot felul de perturbații exterioare – câmpuri magnetice sau electrostatice, bruiaj și descărcări electrice, impulsuri stohastice prin rețeaua de alimenta-re. Zgomotul propriu însă poate influența interpretarea corectă a proceselor, de aceea filtrele numerice necesită semnale suficient de puternice, din acest motiv utilizarea lor în etajele de intrare ale instalațiilor de captare și prelucrare a informației sub forma de semnale electromag-netice nu este justificată. În această poziție filtrele analogice sunt de preferat.

Bibliografie

1. Horowitz P., Hill W., *Arta schemotehnicii*. Editura „МИР”, Moscova 1998.
2. Van der Ziel A., *Noise Surses, characterization and measurement*, Prentice-Hall. Inc. 1970.
3. Guțu V., *Zgomotul electronic al filtrelor active RC*. Monografie, „TEHNICA INFO”, Chișinău 2010.
4. Guțu V., *Meridian ingineresc*, nr.1, pag. 11 - 16, Editura UTM, Chișinău 2012.