

ZGOMOTUL ELECTRONIC – OBSTACOL ÎN CALEA TEHNOLOGIILOR AVANSATE

METODĂ DE CALCUL al zgomotului (propriu) al dispozitivelor electronice (în baza filtrelor active RC, schema Sallen-Key)

Braguța Mihail

Universitatea Tehnică a Moldovei

***Abstract:** Această lucrare este dedicată metodei de calcul a zgomotului propriu al dispozitivelor de selecție a semnalelor prin frecvența, în baza filtrelor active RC.*

Introducere

Din categoria „Tehnologii avansate...” face parte și Tehnologia Informației – poate că chiar cea mai avansată dintre tehnologii, la sfârșit de secol și început de mileniu!

Se poate afirma că la ora actuală nu există o altă sferă a științei și tehnicii moderne, care ar cunoaște o dezvoltare la fel de vertiginoasă. Suntem martorii oculari ai unui proces care s-a desfășurat în ultimele decenii ale sec. XX, și care a atins absolut toate domeniile activității umane: economic și militar, social și de cultură, de activitate științifică și de producție.

Și-au început activitatea profesională mai multe generații de tineri specialiști care s-au născut, s-au maturizat și s-au format în epoca calculatoarelor personale. Reînnoirea tehnicii de calcul în întregime cam la doi ani conduce la o schimbare esențială a metodelor și procedeele de lucru cu calculatorul.

Elementul central în tehnologia informației este operarea cu semnale de natură electrică: selectarea și recepția acestor semnale, procesarea și transmiterea lor. O importanță deosebită în problematica transmiterii și procesării informației o au metodele de calcul sau de modelare matematică atât a semnalelor propriu-zise, cât și a caracteristicilor elementelor și dispozitivelor utilizate în acest scop.

Printre caracteristicile de bază ale componentelor tehnicii de calcul implicate nemijlocit în procesarea semnalelor este considerat și **pragul sensibilității** – acel nivel minim al semnalului de intrare, care mai poate fi deslușit (și prelucrat), pe fundalul **zgomotului** – atât străin, cât și cel **propriu**.

Această lucrare este dedicată metodei de calcul a zgomotului propriu al dispozitivelor de selecție a semnalelor prin frecvență, în baza **filtrelor active RC**. Aceste dispozitive și circuite electronice sunt pe larg folosite în radiotehnică, radioelectronică și telecomunicații pentru selecția semnalelor prin frecvență, în instalații de multiplexare a canalelor de legătură atunci când frecvența semnalelor se află în diapazonul undelor sonore și nu depășește valoarea de 1 MHz.

Se numește **semnal** o mărime fizică măsurabilă, purtătoare de informație, care poate fi transmisă la distanță, recepționată și / sau prelucrată [2].

Elemente din teoria generală a cuadripolurilor „zgomotoși”

În lucrare este prezentată o metodă de analiză și calcul al zgomotului propriu al filtrelor active RC, în varianta constructivă compatibilă cu normele și exigențele tehnologiilor noi utilizând metode de calcul computerizate.

Idea principală a acestei metode constă în faptul că o mare parte dintre elementele, dispozitivele și chiar ansamblurile electronice – părți componente ale mijloacelor moderne de calcul – pot fi prezentate ca dipoli, tri-, cuadri - și multipoli. În continuare sunt prezentate elemente din teoria generală a zgomotului cuadripolurilor liniari. Pe această bază se stabilesc relațiile ce permit determinarea proprietăților sumare de zgomot (efectul total de zgomot) sub forma unui generator,

echivalent și sumar al curentului ($I_{Z\Sigma}$) sau al t.e.m. ($E_{Z\Sigma}$) al oricărui cuadripol, autonom pasiv sau neautonom activ, exprimat prin parametrii Y sau Z .

Toate dispozitivele liniare de amplificare fac parte din categoria cuadripolurilor activi neautonomi, din care motiv analiza și calculele schemelor echivalente de zgomot ale acestor cuadripol prezintă o importanță deosebită. Cu atât mai mult, că din această clasă de cuadripol fac parte și filtrele active RC .

Amplificatoarele și filtrele au, de regulă, o bornă comună de intrare și ieșire, de aceea corespund cazului general de cuadripol activ, liniar și neautonom. Pentru cuadripolii pasivi, la fel ca și pentru cuadripolii activi și autonomi (figura 1) se pot scrie următoarele egalități [3]:

$$Z_{12} = Z_{21}; Y_{12} = Y_{21}; H_{12} = -H_{21}, \quad (1)$$

ce caracterizează simetria (reversibilitatea) lor. De aceea, pentru a caracteriza astfel de cuadripoli sunt îndeajuns doar trei parametri electrici. În cazul cuadripolilor activi dar neautonomi, din cauza inegalităților

$$Z_{12} \neq Z_{21}; Y_{12} \neq Y_{21}; H_{12} \neq -H_{21}, \quad (2)$$

pentru descrierea lor sunt necesari patru parametri electrici.

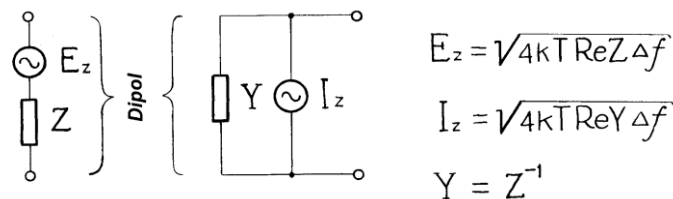


Fig. 1. Prezentarea echivalentă a proprietăților de zgomot ale unui dipol.

Această condiție este valabilă și în cazul parametrilor de zgomot: ansamblul minim de parametri de zgomot statistic independenți care caracterizează schema dată, în general este egal cu ansamblul minim al parametrilor electrici independenți.

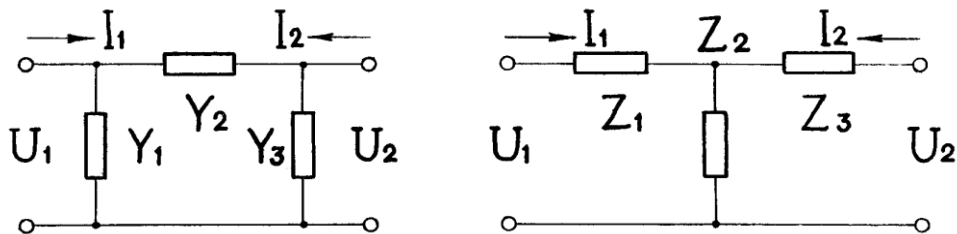


Fig.2. Schemele de tip Π și T ale cuadripolilor.

Din teoria circuitelor și sistemelor se cunoaște bine că orice circuit electric, cât de complicat ar fi dar care nu conține surse de energie (adică pasiv), poate fi transformat în mod echivalent într-o schemă cu o pereche (dipol, figura 1) sau două perechi (cuadripol, figura 2) de borne. Dacă circuitul conține elemente complexe constituite din rezistențe, condensatoare și, în cazul general – bobine, atunci proprietățile lui de zgomot pot fi descrise cu ajutorul generatoarelor echivalente de **zgomot termic**.

Așa, de exemplu, dipolul poate fi prezentat printr-un generator echivalent de t.e.m. de zgomot, în serie cu rezistența ideală (fără zgomot), sau printr-un generator echivalent de curent în paralel cu conductanța ideală, ca în figura 1.

Dacă în urma transformărilor (echivalente) circuitul se aduce la schema echivalentă cu patru borne, atunci din punct de vedere al caracteristicilor de zgomot aceasta poate fi considerată drept un cuadripol autonom care conține doar surse de zgomot termic.

Proprietățile de zgomot ale cuadripolului autonom cu latură (bornă) comună, pot fi exteriorizate prin trei parametri de zgomot statistic independenți, sub forma de **generatoare de tensiuni** sau **curenți de zgomot**.

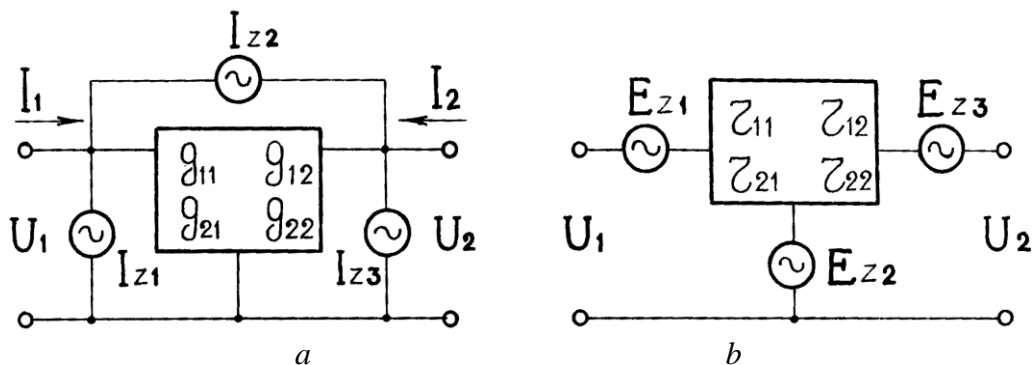


Fig. 3. Prezentarea echivalentă a proprietăților de zgomot ale cuadripolilor.

În conformitate cu cele expuse, în figura 3 este prezentată schema echivalentă de zgomot a unui circuit electric pasiv. Schema electrică propriu-zisă sub forma de cuadripol cu bornă comună (și deci tripol) este dată prin parametrii \mathbf{Y} și \mathbf{Z} . Dat fiind faptul că în procesul „zgomotos” sunt implicate doar părțile reale \mathbf{Y} și \mathbf{Z} , în figura 3 este prezentat cuadripolul în parametrii săi \mathbf{J} și \mathbf{r} . Sistemul de ecuații, ce leagă curenții și tensiunile de intrare și ieșire, în cazul schemei din figura 3, a este:

$$I_1 = J_{11} U_1 + J_{12} U_2; \quad I_2 = J_{21} U_1 + J_{22} U_2, \quad (3)$$

iar pentru schema din figura 3, b

$$U_1 = r_{11} I_1 + r_{12} I_2; \quad U_2 = r_{21} I_1 + r_{22} I_2. \quad (4)$$

Un interes deosebit de important în calculul zgomotului prezintă transformarea echivalentă a schemelor de zgomot, care în final simplifică calculele și analiza acestuia [4].

Generatoarele echivalente de zgomot din figura 3, a și b pot fi prezentate analitic (ca generatoare de zgomot termic) astfel:

$$\overline{I_{zi}^2} = 4 k T J_i \Delta f; \quad (5)$$

$$\overline{E_{zi}^2} = 4 k T r_i \Delta f, \quad (6)$$

unde $i = 1 \div 3$

$$J_1 = J_{11} + J_{12}; \quad J_2 = -J_{12}; \quad J_3 = J_{22} + J_{12};$$

$$r_1 = r_{11} + r_{12}; \quad r_2 = r_{12}; \quad r_3 = r_{22} - r_{12}.$$

(7)

Raportul dintre parametrii de zgomot ai schemelor figura 3, a și 3, b este dat de relațiile [4]:

$$\overline{E_{z1}^2} = \Delta r \cdot \overline{I_{z3}^2}; \quad \overline{E_{z2}^2} = \Delta r \cdot \overline{I_{z2}^2}; \quad \overline{E_{z3}^2} = \Delta r \cdot \overline{I_{z1}^2}. \quad (8)$$

Valoarea tensiunii sau a curentului de zgomot ai respectivului generator echivalent poate fi calculată, utilizând relațiile (5) – (8). Practic însă, este mult mai important să se evalueze efectul de zgomot sumar al oricărei scheme concrete. Acest efect sumar de zgomot, sub forma unui curent sau a unei tensiuni sumare, poate fi determinat pe calea simplificării consecvente a schemelor din figura 3, a și b, trecând de la o schemă echivalentă la alta, mai simplă. O metodă eficientă de simplificare a analizei și a calculelor proprietăților zgomotoase ale diverselor scheme este **metoda transunerii** generatoarelor de curent sau t.e.m., de pe un sector al schemei pe altul, fără a modifica efectul exterior de zgomot al schemei, în conformitate cu teoremă Thevenenă [4].

Calcularea zgomotului propriu al filtrelor active RC

Orice filtru activ RC (FA-RC) poate fi considerat ca o conexiune de tripoli, pasivi și activi. De unde urmează că principiile teoriei generale de analiză și calcul a zgomotului tripolilor considerate mai sus, sunt aplicabile și pentru calculul zgomotului propriu al FA-RC.

Pentru analiza și calculul zgomotului propriu al FA-RC este necesar de a realiza condiția de scurtcircuit sau de mers în van pe bornele de intrare. Deși aceste condiții poartă o încărcătură abstractă, ele sunt totuși, un instrument convenabil ce ușurează analiza și simplifică calculul zgomotului. Cu atât mai mult că gravitatea acestei idealizări totdeauna poate fi evaluată.

Dinamica (succesiunea) calculului zgomotelor proprii ale filtrelor active RC va fi prezentată pe baza unui caz particular, a schemei ce poartă denumirea de „schema Sallen-Key”, după numele autorilor Sallen R. și Key F. Această schemă este frecvent utilizată în practica elaborării și construirii filtrelor active, cu cele mai diverse caracteristici funcționale [5]: FTJ; FTS; FTB. În figura 4 se poate vedea schema electrică a filtrului ce realizează funcție trece-jos (FTJ); FTS și FTB însemnând, respectiv funcție trece-sus și funcție trece-bandă.

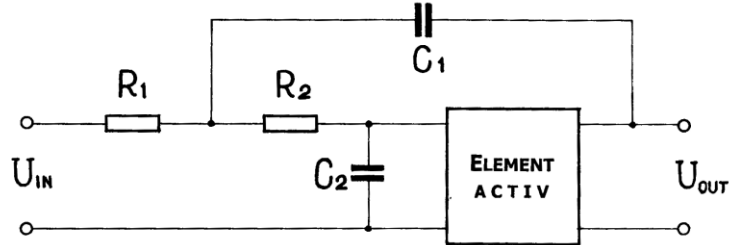


Fig. 4. Schema FTJ Sallen-Key.

Din această schemă se vede clar că dacă pe bornele de intrare se asigură un regim de scurtcircuit, FTJ poate fi considerat ca o conexiune în paralel a doi tripoli, unul dintre aceștia fiind pasiv (circuitul RC), celălalt – activ (tranzistor, amplificator operațional, iar în cazul general – element activ).

Deoarece fiecare tripol poate fi prezentat prin matricea parametrilor Y în paralel iar proprietățile lui de zgomot – printr-un generator echivalent sumar de zgomot I_{ZZ} , filtrul FTJ este posibil să arate așa ca în figura 5,a. O astfel de prezentare a FTJ, ca o conexiune în paralel a doi tripoli, este convenabilă în faza de analiză a schemei, dar și indispensabilă pentru calculul zgomotului, ținându-se cont în același timp de prezența buclei de reacție. Merită de subliniat aparte că, chiar și în puținele lucrări dedicate analizei și calculului zgomotului FA-RC, prezența buclei de reacție sau nu se ia în considerare în general, sau este stipulată într-o formă atât de legeră, încât aceasta este echivalent cu... ignorarea prezenței. Desigur, aceasta simplifică considerabil calculele, dar nu fără prejudicii aduse gradului de exactitate.

Această prezentare este convenabilă încă dintr-un punct de vedere: permite calculul proprietăților de zgomot al filtrelor active cu ajutorul instrumentelor algebrei matriciale care se bucură de o largă utilizare în cele mai diverse sfere ale științei și tehnicii, permițând implementarea mijloacelor computerizate. Aceste mijloace (pachete *software*) se bucură de același succes, ca și în cazul de sinteză a FA-RC, după caracteristicile de amplitudine- și fază-frecvență.

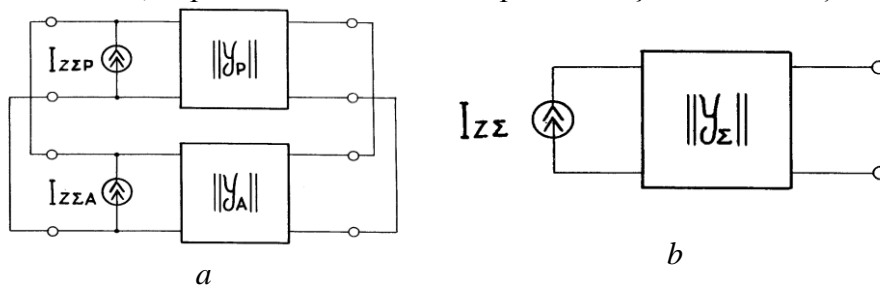


Fig. 5. Prezentarea unui FTJ ca o conexiune a doi tripoli.

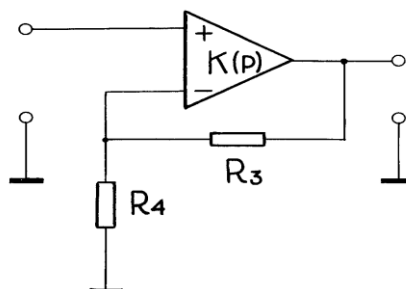


Fig. 6. Amplificator operațional ca element activ.

Așadar, filtrul activ poate fi privit (și considerat) ca fiind un tripol activ neautonom generalizat (figura 5, b), pentru care se poate scrie:

$$\|Y_{\Sigma}\| = \|Y_A\| + \|Y_P\|, \quad (9)$$

$$I_{Z\Sigma}^2 = I_{Z\Sigma A}^2 + 2\xi I_{Z\Sigma A} I_{Z\Sigma P} + I_{Z\Sigma P}^2, \quad (10)$$

unde: ξ este coeficientul (gradul) de corelație dintre generatoarele de zgomot, $I_{Z\Sigma A}$ și $I_{Z\Sigma P}$.

Media pătratică a curentului $I_{Z\Sigma}^2$ – efectul sumar al curentului de zgomot al tripolului pasiv – depinde totalmente de parametrii Y ai acestui tripol. Determinarea acestor parametri nu prezintă careva dificultăți din punct de vedere principial, deși în anumite cazuri expresiile respective se pot dovedi voluminoase și greoaie. Dar asta-i realitatea.

Pentru a calcula $I_{Z\Sigma A}^2$ pot fi utilizate relațiile analitice obținute [4]. Trebuie însă de menționat că aici apare o dificultate serioasă: calculul, ba chiar și măsurarea parametrilor Y ai tripolului activ nu prezintă un proces univoc iar în unele cazuri este pur și simplu imposibil. Utilizarea unui amplificator cu două – trei tranzistoare în calitate de element activ este la ora actuală deja un indiciu de prost gust, o aberație; în această calitate sunt folosite circuite integrate speciale – **amplificatoarele operaționale**. Avantajele de bază a unui amplificator operațional (AO) sunt gradul înalt de stabilitate și reproducere a parametrilor, funcționalitatea multiplă și posibilitatea construirii filtrelor active în varianta microminiaturizării extreme, ceea ce este deosebit de important în lumina problemelor pe care le soluționează microelectronica integrată modernă.

Un etaj de amplificare pe două tranzistoare poate fi prezentat ca o schemă echivalentă care se descrie cu ajutorul unei matrice pătrate, de ordinul 6; a opera cu o astfel de matrice este destul de anevoios. În aceasta și constă complexitatea deosebită în prezentarea AO printr-o schemă echivalentă și operarea transformărilor echivalente și calculelor ulterior necesare. Pe de altă parte, utilizarea AO (se produc la scară mondială în serii mari, timp de vreo 40 de ani) în proiectarea și construirea filtrelor active a devenit o necesitate imperioasă. De obicei, foaia tehnică (sau pașaportul) ce însoțește AO nou fabricat, nu conține parametrii Y iar măsurarea lor experimentală întâmpină anumite dificultăți (o largă varietate a acestor dispozitive electronice și lipsa aparatelor și metodei universale de măsurare).

Din motive expuse mai sus, parametrii Y se calculează în prealabil pe baza celorlalte date tehnice. De exemplu, datele tipice ale unui AO (aici se păstrează marcarea dispozitivelor analoge în forma originală, rusă și americană – în paranteze), marca KP544YД1 “Perara” ($\mu A741$, firma Faichild):

- rezistența de intrare $Z_{IN} = 2 \cdot 10^5 \Omega$;
- coeficientul de transfer (de amplificare) în tensiune, cu bucla de reacție decuplată $\sim 2 \cdot 10^4$;
- coeficient pe bucla de reacție egal cu 0;
- rezistența de ieșire $Z_{OUT} = 2 \cdot 10^2 \Omega$.

În sensul fizic acești parametri sunt mai aproape de sistemul de parametri h al cuadripolului. De aceea se poate scrie că:

$$h_{11A} = Z_{INAO} = 2 \cdot 10^5 \Omega; \quad h_{12A} = 0;$$

$$h_{21A} = 2 \cdot 10^4 \Omega; \quad h_{22A} = 1/Z_{OUTAO} = 5 \cdot 10^{-3} S.$$

Folosind metoda transformării matricelor, se poate trece ușor la matricea $\|Y\|$ pentru care:

$$Y_{11A} = 5 \cdot 10^{-6} S; \quad Y_{12A} = 0; \quad Y_{21A} = 2 \cdot 10^4 \Omega; \quad Y_{22A} = 5 \cdot 10^{-3} S. \quad (11)$$

În baza acestor date, folosind metoda de calcul a zgomotului propriu al filtrelor active RC propusă în această lucrare și a măsurărilor experimentale, au fost obținute rezultate satisfăcătoare în practica inginerescă de proiectare și construire a dispozitivelor de selecție a semnalelor prin frecvență. Din lipsă de spațiu, aici prezentăm doar un singur caz – al filtrului trece-jos (FTJ) schema Sallen-Key (figura 8).

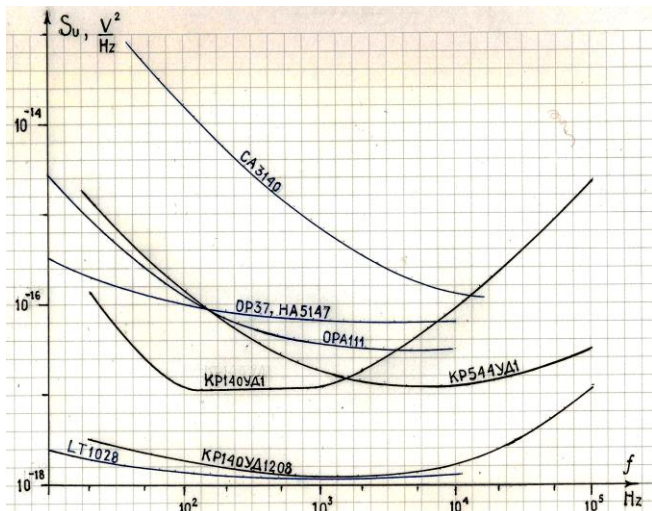


Fig. 7. Densitatea spectrală a tensiunii de zgomot a unor

AO de producție ex-sovietică și occidentale
(Fairchild Cam. and Instr. Corp., Toyo-Rohn ,
Tochiba etc.)

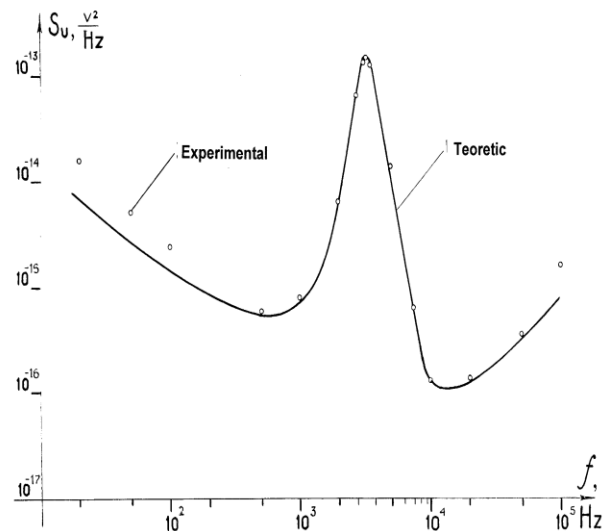


Fig. 8. $S_U = \varphi(f)$. FTJ Sallen-Key.

Cuvinte cheie

Filtre, circuite pasive, filtre active, funcția trece-jos, trece-sus, trece-bandă, amplificator operațional, zgomot, dipoli, tripoli, cuadripoluri, zgomot propriu, scheme, tehnica de calcul, măsurarea zgomotului, metoda de calcul, zgomot termic, scheme de realizare, caracteristici de zgomot, curent, tensiune, densitatea spectrală, schemă echivalentă, generator echivalent de zgomot, borne.

Literatură de referință

1. Guțu V., Guțu E., Gușu Iu. *Informatica. Partea I și Partea II*. Editura „TEHNICA INFO”, Chișinău 2008.
2. Ceangă E. și alții. *Semnale, circuite și sisteme. Partea I*. Editura ACADEMICA, Galați 2001.
3. Деметъев Е. П. *Элементы общей теории и расчёта шумящих линейных цепей*. Госэнергоиздат, Москва - Ленинград 1968 г.
4. Guțu V. *Filtre active RC. Monografie*. Editura „TEHNICA INFO”, Chișinău 2009.
5. Хьюлсман Л. *Активные RC – фильтры*. Издательство «Мир», Москва 1972 г.