

INGINERIA FILTRELOR ACTIVE RC ȘI ZGOMOTUL ELECTRONIC

Prof. dr. ing. Valentin GUȚU

Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, R. Moldova

REZUMAT. Această lucrare este dedicată analizei rezultatelor metodei de calcul și a măsurărilor experimentale a zgomotului propriu al dispozitivelor și echipamentelor electronice de selecție a semnalelor prin frecvență – filtrele active RC, schemele Sallen-Key, Teylor și Raukh. Aceste scheme de realizare permit obținerea funcțiilor de transfer trece-sus (FTS), trece-jos (FTJ) și trece-bandă (FTB). Sunt prezentate și analizate rezultatele calculelor teoretice și a măsurărilor experimentale a zgomotului propriu al elementelor filtrelor active – amplificatoarelor operaționale, este studiată influența componentelor pasive și a factorului de calitate ale unui etaj de filtrare de ordinul doi în schemele menționate. Analiza confirmă posibilitatea utilizării practice a metodelor de calcul și de măsurare a densității spectrale a zgomotului propriu și permite elaborarea unor recomandări principiale noi pentru asamblarea filtrelor active RC, cu nivel scăzut de zgomot.

Cuvinte cheie: filtre active, funcție de transfer trece-jos, trece-sus, trece-bandă, amplificator operațional, zgomot propriu, caracteristici de zgomot, densitatea spectrală.

ABSTRACT. This paper is dedicated to the analysis results of calculation method and experimental measurement of own noise of electronic devices and equipment for signals selection by frequency - the RC active filters, Sallen-Key, Teylor and Raukh version. This scheme allows the realization of active filters to obtain the transfer function high-pass (HPF), low-pass (LPF) and pass-band (PBF). Are presented and analysed the results of theoretical calculations and experimental measurements of its noise active filter elements - the operational amplifiers, is studied the influence of passive components and the quality factor of a second order filter floor in the schemes mentioned. Analysis confirms the practical possibility of using the method of calculation and measurement of its noise spectral density and allows the development of fundamentally new recommendations for active filters assembly, with low noise.

Keywords: active filter, pass-low, pass-high, pass-band transfer function, operational amplifier, own noise, noise characteristics, spectral density.

1. INTRODUCERE

Analiza efectuată în actuala lucrare urmărește două scopuri: a) evaluarea gradului de exactitate a metodei de calcul a zgomotului propriu al filtrelor active RC în varianta constructivă a tehnologiei integrate; b) aprecierea exactității măsurărilor zgomotului propriu al diferitelor dispozitive aparte (a amplificatoarelor operaționale, AO) și a filtrelor active RC (FA-RC), în ansamblu.

În conformitate cu aceste scopuri, în lucrare sunt prezentate rezultatele investigațiilor și măsurărilor experimentale ale caracteristicilor de zgomot ale unor amplificatoare operaționale, așa ca: KP544YD1 (analog american $\mu A741$), KP140YD1208 ($\mu A776$), K553YD2 (LM101) și AO NSZ (nivel scăzut de zgomot) sub denumirea codificată „Radical”. Sunt prezentate de asemenea rezultatele analizei caracteristicilor experimentale ce oglindesc proprietățile de zgomot ale celor mai frecvent utilizate în practică scheme de realizare a FA-RC. În baza calculelor și analizei efectuate, la fel ca și a investigațiilor și măsurărilor experimentale în lucrare sunt concretizate și formulate un șir de sfaturi și recomandări

pentru construirea echipamentelor de selecție a semnalelor prin frecvență cu nivel scăzut de zgomot.

2. ANALIZA CARACTERISTICILOR DE ZGOMOT ALE UNOR AMPLIFICATOARE OPERAȚIONALE

Foia tehnică (sau pașaportul tehnic) a amplificatoarelor operaționale moderne conține zeci de parametri și caracteristici diferite. Dar nici până în prezent, printre aceste date tehnice ale AO nu se pot întâlni informații despre proprietățile de zgomot ale acestor dispozitive. În diverse publicații de până în anul 2000, la fel ca și în cele de după întâlnim informații despre proprietățile de zgomot ale elementelor (tranzistoarelor, bipolare și cu efect de câmp) și dispozitivelor ce le conțin – amplificatoarele operaționale în primul rând. De exemplu, în lucrarea [2] sunt prezentate caracteristicile de zgomot ale unui șir de tranzistoare (figura 1), în varianta densității spectrale a curentului de zgomot, i_z . În aceeași sursă pot fi găsite și caracteristici analoge ale AO sau a unor părți componente ale acestora, cum ar fi amplificatoarele (etajele) diferențiale sau cele cu buclă de reacție. Utilizarea AO în serii mai scurte în

evidență noi cerințe, tot mai aspre și peremptorii, în privința elaborării și construirii schemelor cu parametri performanți, cu un nivel tot mai scăzut de zgomot propriu.

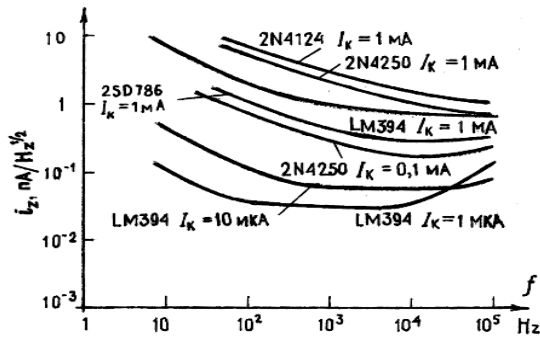


Fig. 1. Densitatea spectrală a curentului de zgomot în funcție de curentul de colector ale unor tranzistoare.

Nivelul foarte jos al multor semnale care trebuie să fie captate, prelucrate și deseori – măsurate, în foarte multe cazuri practice se află la limita zgomotului propriu al elementelor active ale dispozitivelor și aparatelor utilizate. În calitate de exemplu am putea aminti aici de miile de fotografii ale planetei Jupiter și datele telemetrice, transmise de la distanțe enorme (cosmice!) de peste 100 mln kilometri, de către radiotelescopul spațial Hubbel.

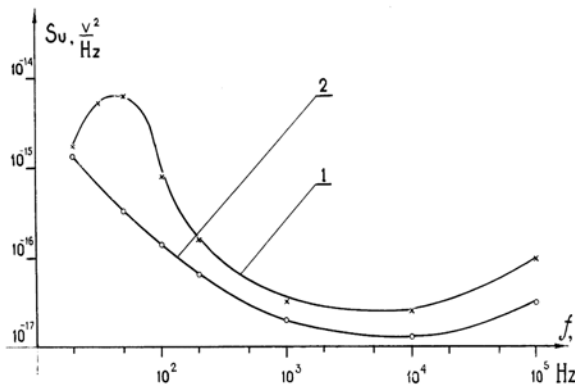


Fig. 2. Caracteristicile $S(f)$ ale AO obținute prin metoda directă (1) și metoda modulației (2) de măsurare.

Semnale la fel de slabe întâlnim într-o mulțime de sfere ale științei și tehnicii ingineresti și pe bătrâna noastră planetă. Și în toate cazurile este stringentă nevoie de metode de calcul și mijloace tehnice performante pentru măsurarea zgomotului, cu suficientă și garantată exactitate.

Rezultatele măsurărilor experimentale realizate în această lucrare urmăresc scopul să completeze informația și cunoștințele despre proprietățile de zgomot ale amplificatoarelor operaționale, prezentate în lucrarea [3] și în așa mod să contribuie la o mai profundă percepere, evaluare și, în final – diminuare a nivelului zgomotului propriu al FA-RC. În urma studierii atente a celor mai cunoscute metode destinate măsurării

caracteristicilor de zgomot (în particular – a densității spectrale), a avantajelor și părților negative ale acestor metode este argumentată alegerea metodei de măsurare prin modulație.

Această metodă, asigurând suficientă precizie și sensibilitate rezonabilă, permite concomitent și o protecție contra perturbațiilor ce vin din rețeaua de alimentare cu energie (50 Hz).

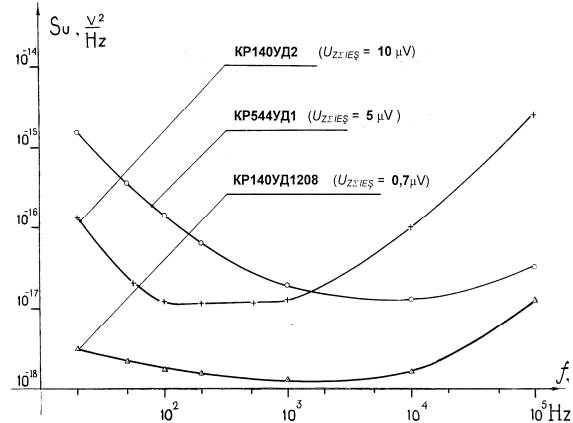


Fig. 3. Densitatea spectrală a zgomotului diferitelor amplificatoare operaționale.

Cele menționate mai sus pot fi confirmate, examinând rezultatele măsuririlor densității spectrale ale zgomotului $S(f)$ prin metoda de modulație și metoda directă, la ieșirea amplificatorului operațional KP544YD1. Analiza caracteristicilor obținute (figura 2) arată în mod clar că nivelul densității spectrale a zgomotului este mai înalt în cazul metodei directe de măsurare (curba 1), în medie de 1,5 – 2 ori, decât în cazul metodei de modulație (curba 2).

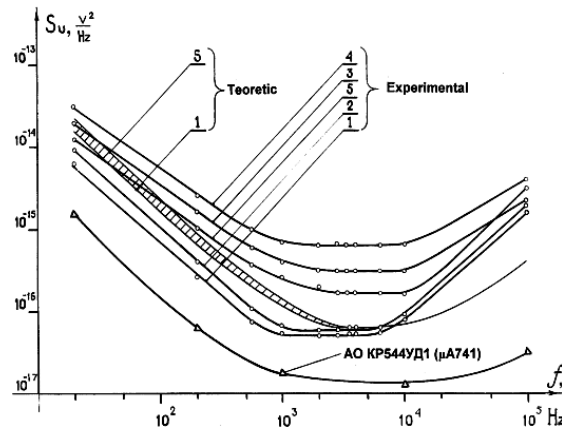


Fig. 4. Caracteristici teoretice și experimentale $S_u(f)$ FTJ Sallen-Key.

Afară de aceasta, la frecvența 50 Hz caracteristica $S(f)$ - curba 1, suportă un salt care evidențiază influența rețelei de alimentare asupra rezultatelor măsurării prin metoda directă; această influență duce la creșterea densității spectrale a zgomotului cam cu 1,5 ordine de mărime. Prin urmare, în metoda directă

apare o eroare suplimentară de măsurare de 45 – 50 %, iar la frecvența 50 Hz această eroare poate atinge și 150 %. Măsurările în cauză s-au efectuat pentru partide de câte 25 – 30 de exemplare de amplificatoare operaționale KP140YД2 („Istoc”), KP544YД1 („Regata”), și câte 5 exemplare de amplificatoare operaționale KP140YД1208 („Radical”) cu nivel scăzut de zgomot (analog $\mu A779$). Rezultatele acestor măsurări sunt prezentate în figura 3.

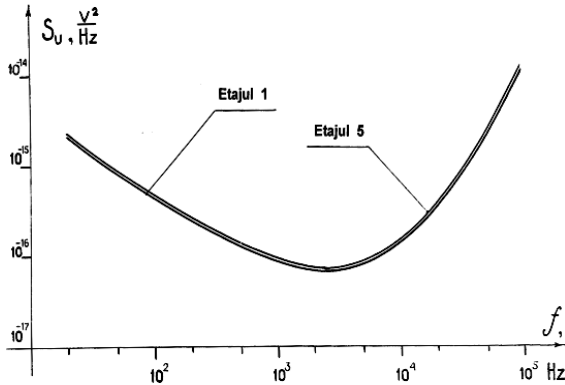


Fig. 5. Caracteristici $S_U(f)$ FTJ Teylor.

Analiza lor permite stabilirea particularităților de zgomot ale amplificatoarelor operaționale de fiecare tip. Amplificatorul operațional KP544YД1 („Regata”) posedă un nivel mai înalt de zgomot de frecvență joasă (*flicker*), ceea ce se datorează, presupunem particularităților tehnologice de construire ale acestui circuit integrat: concentrației inițiale a purtătorilor de sarcină în materialul plăcii de siliciu; distribuției și concentrației defectelor materialului semiconductor (dislocații, defecte de împachetare, calitatea stratului de bioxid de siliciu SiO_2 , condițiilor și stării „hotarului” $Si - SiO_2$).

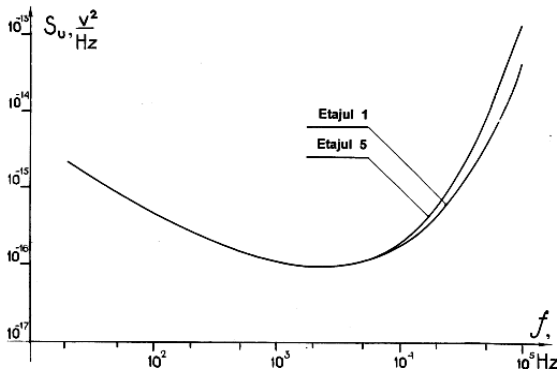


Fig. 6. Caracteristici $S_U(f)$ FTJ Raukh.

La frecvențe joase proprietățile de zgomot ale AO KP140YД2 („Istoc”) sunt de preferat: la frecvența de 20 Hz densitatea spectrală a zgomotului este de aproximativ 10 ori mai mică, decât în cazul AO KP544YД1 („Regata”). La frecvențe mai înalte însă, tabloul se schimbă radical: densitatea spectrală a zgomotului AO KP140YД2 crește considerabil și deja la frecvența de 10 kHz depășește de 10 ori $S(f)$ a

amplificatorului KP544YД1. Aceasta se poate explica prin caracteristicile de frecvență diferite ale acestor AO; izolarea componentelor integrate la AO KP140YД2 se realizează cu ajutorul joncțiunii *pn* polarizate invers [4], iar la AO KP544YД1 aceasta se face prin amplasarea respectivelor componente în așa-numitele „buzunare” – un volum de semiconductor, izolat de restul volumului plăcii cu un satrat izolant de SiO_2 . Astfel se obțin caracteristici de frecvență mai bune, dar dar procesul tehnologic este mai complicat și mai costisitor. Ca rezultat, în diapazonul de frecvențe 20 Hz ÷ 100 kHz tensiunea efectivă sumară a zgomotului la ieșirea AO KP544YД1 este $U_{ZSIE\mathcal{S}} = 5 \mu V$, iar la ieșirea lui KP140YД2 $U_{ZSIE\mathcal{S}} = 10 \mu V$, *id* este de două ori mai mare. Aceasta, împreună cu alte priorități funcționale caracteristice AO KP544YД1 (stabilitate înaltă a coeficientului de transfer, un *drift* și deviere mică de 0, corecție simplă, rezistență și stabilitate) s-au dovedit hotărâtoare și determinante în alegerea acestui tip de amplificator ca element activ al FA-RC.

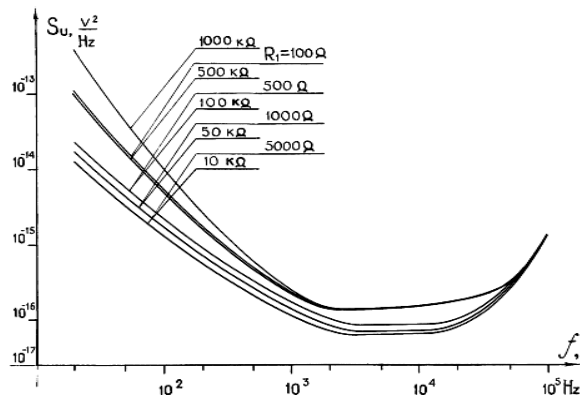


Fig. 7. Caracteristici $S_U(f)$ și $R_1 = \text{var}$ (FTJ Sallen-Key; $K_0 > 0$, $f_i = 3,4 \text{ kHz}$, $U_{ZSIE\mathcal{S}} = 15 \mu V$).

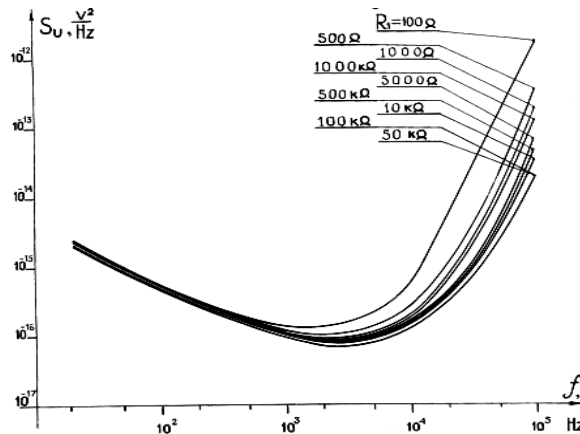


Fig. 8. Caracteristici $S_U(f)$ și $R_1 = \text{var}$ (FTJ Teylor, $K_0 < 0$, $f_i = 3,4 \text{ kHz}$, $U_{ZSIE\mathcal{S}} = 23 \mu V$).

Din analiza acelorăși caracteristici urmează că cele mai puțin „zgomotoase” sunt AO KP140YД1208 („Radical”). Datele experimentale obținute în această lucrare se află în deplină concordanță cu premisele teoretice din [2], în conformitate cu care o diminuare

considerabilă a zgomotului tranzistoarelor planare este reală și posibilă, în regim de funcționare la curenți cât mai mici, de ordinul microamperilor ($I_E \leq 10 \mu A$). În cazul acestor AO $U_{ZSIEŞ} = 0,7 \mu V$, deci din punctul de vedere al proprietăților de zgomot aceste amplificatoare sunt de preferat. Se poate de presupus că tocmai aici există anumite posibilități reale și că este de așteptat, ca aceste AO să devină componente de perspectivă ale filtrelor active RC, cu nivel foarte scăzut de zgomot.

3. RECOMANDAȚII INGINEREȘTI ÎN CONSTRUCȚIA ECHIPAMENTELOR CU NIVEL SCĂZUT DE ZGOMOT

În lucrările [6], [7] și altele a fost efectuată o analiză detaliată a rezultatelor teoretice și experimentale de studiere a proprietăților de zgomot ale diferitor scheme de realizare ale FA-RC.

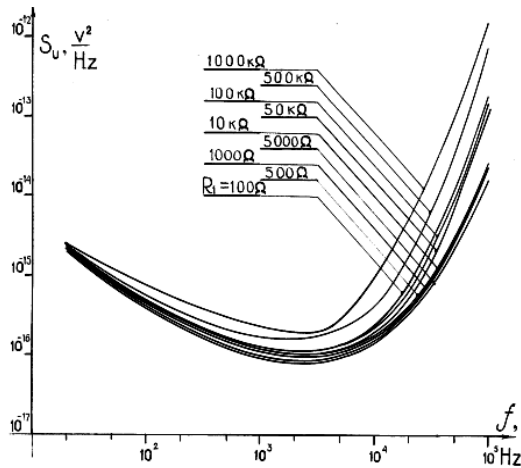


Fig. 9. Caracteristici $S_U(f)$ și $R_1 = \text{var}$. (FTJ Raukh, $K_0 < 0$, $f_i = 4,4 \text{ kHz}$, $U_{ZSIEŞ} = 15 \mu V$).

Pe baza rezultatelor obținute și a concluziilor trase este posibilă elaborarea unei serii de recomandări practice, care ar contribui la proiectarea și construirea filtrelor active RC cu nivel scăzut de zgomot propriu, pe larg utilizate pentru selectarea semnalelor prin frecvență în cele mai diverse sfere: telecomunicații (comprimarea și decompimarea canalelor de legătură), radiotehnică și TV, astronomie și legături cosmice la distanțe enorme și multe - multe alte domenii colaterale.

3.1. Realizarea filtrelor trece-jos (FTJ)

Analizei proprietăților de zgomot continuă să fie supuse trei scheme de realizare a FTJ, cel mai frecvent utilizate în practică: *Sallen-Key* ($K_0 > 0$); *Taylor* ($K_0 < 0$, o singură buclă de reacție); *Raukh* ($K_0 < 0$, buclă de reacție multiplă); aici K_0 este coeficientul de transfer al AO.

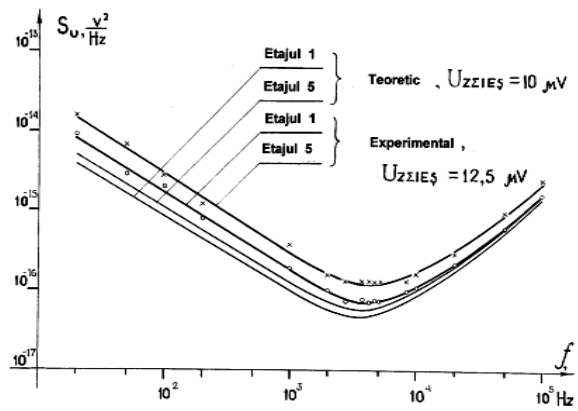


Fig. 10. Caracteristici $S_U(f)$ și $R_1 = \text{var}$ (FTS Sallen-Key, $f_i = 4,4 \text{ kHz}$).

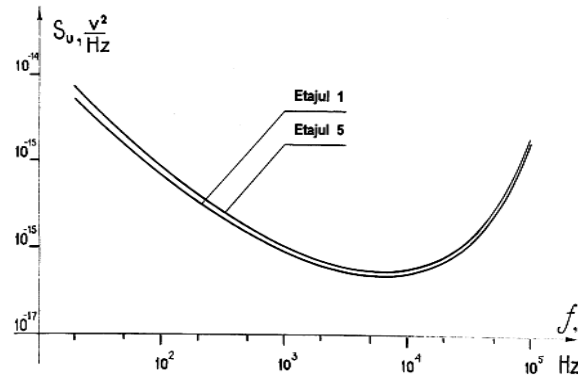


Fig. 11. Caracteristici $S_U(f)$ FTS Taylor.

Așadar:

1) Comparația densității spectrale a zgomotului la ieșirea unui etaj FTJ *Sallen-Key*, *Taylor* și *Raukh* permite stabilirea deosebirilor cantitative și, principalul – calitative ale acestor scheme de realizare a filtrelor trece-jos. FTJ *Sallen-Key* (figura 4) posedă un nivel mai înalt de zgomot *flicker* (aproximativ de 10 ori mai înalt la 20 Hz) decât FTJ *Taylor* (figura 5) și *Raukh* (figura 6).

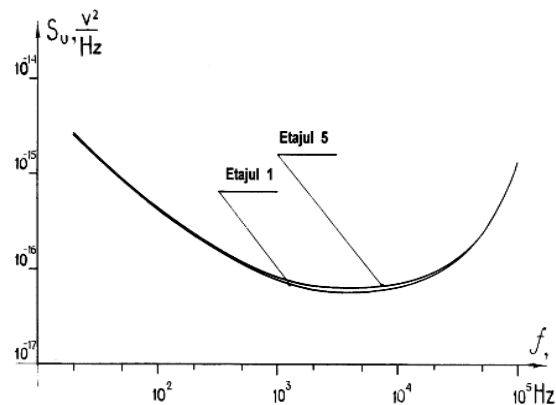


Fig. 12. Caracteristici $S_U(f)$ FTS Raukh.

În același timp, dacă modificarea elementelor pasive RC ale FTJ *Sallen-Key* provoacă o modificare a zgomotului *flicker* la 20 Hz cu 1,5 ordin de mărime, în

schemele *Taylor* și *Raukh* modificările analoage nu influențează în general zgomotul *flicker* la aceiași frecvență (figurile 7, 8, 9). Totodată, din comparația figurilor 4, 5, 6 și 7, 8, 9 se vede clar că FTJ *Taylor* și *Raukh* posedă un nivel de zgomot considerabil la frecvențe mai înalte; așa, la frecvența de 100 kHz densitatea spectrală a zgomotului FTJ *Sallen-Key* este $S_U = 6 \cdot 10^{-16} \text{ V}^2 / \text{Hz}$, *Taylor* – $S_U = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ V}^2 / \text{Hz}$, *Raukh* – $S_U = 1,2 \cdot 10^{-13} \text{ V}^2 / \text{Hz}$. Prin urmare, efectuând o alegere a schemei FTJ și dorind minimizarea zgomotului propriu al acestuia, în practică este rezonabil să se țină cont de următoarele considerente:

– pentru asigurarea unui nivel scăzut de zgomot în banda de trecere FTJ este indicată utilizarea etajelor de ordinul 2 *Raukh* și *Taylor*;

– dacă este necesar un nivel mai mic de zgomot în afara BT (benzii de trecere), atunci este justificată utilizarea etajelor de ordinul 2 *Sallen-Key*.

2) Din comparația curbilor prezentate în figurile 4, 5 și 6 se poate stabili de asemenea că influența factorului de calitate asupra densității spectrale a zgomotului cel mai puțin se resimte în cazul FTJ *Raukh*, ceva mai mult – în cazul FTJ *Sallen-Key*; FTJ *Taylor* din acest punct de vedere ocupă o poziție de mijloc.

3) Pentru a micșora nivelul de zgomot propriu la ieșirea filtrului FTJ este de preferat ca etajele de ordinul 2 ce-l alcătuiesc să posede un factor Q mai mic; în cazul utilizării etajelor de ordinul 2 de calitate diferită, etajele cu factorul de calitate mai înalt se conectează primele, cu factorul Q mai mic – ultimele. Așa se reușește micșorarea tensiunii efective sumare de ieșire a zgomotului de două și mai multe ori (figurile 4, 5, 6).

3.2. Realizarea filtrelor trece-sus (FTS)

4. Din punct de vedere al zgomotului propriu etajul FTS în cazul celor trei variante de scheme de realizare sunt aproximativ de egală valoare (figurile 10, 11, 12). Așa, tensiunea efectivă sumară de zgomot la ieșirea etajului FTS: *Sallen-Key*, $U_{\Sigma IES} = 10 \mu\text{V}$; *Taylor*, $U_{\Sigma IES} = 13 \mu\text{V}$; *Raukh* – $U_{\Sigma IES} = 10 \mu\text{V}$.

5. Densitatea spectrală a zgomotului la ieșirea unui etaj FTS cel mai puțin depinde de valorile elementelor pasive RC în cazul schemei *Raukh*; o influență ceva mai mare asupra $S_U(f)$ are loc în cazul schemelor *Sallen-Key*, cu precădere la frecvențe joase; cu aproape 1 – 1,5 ordin de mărime se poate

modifica $S_U(f)$ la ieșirea etajului FTS *Taylor*. Dar nivelul minim al $S_U(f)$ este aproximativ același în toate schemele, deși se obține acest minim pentru valori diferite ale elementelor de schemă pasive: FTS *Sallen-Key* pentru $R_1 = (5 \div 10) \text{ k}\Omega$; *Taylor* – $R_1 = (50 \div 100) \text{ k}\Omega$; *Raukh* – $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ (figurile 7, 8, 9).

4. CONCLUZII

Recomandările succint formulate mai sus s-au dovedit utile în practica elaborării filtrelor active RC cu nivel scăzut de zgomot propriu, utilizate ca dispozitive pentru selecția semnalelor prin frecvență. Rezultatele de bază ale acestei lucrări au fost implementate într-o serie de proiecte, din cadrul Institutului de Cercetări Științifice Micro Aparatură (abreviația în limba rusă – НИИМП).

Majoritatea rezultatelor și a recomandărilor propuse au contribuit la crearea filtrelor active cu nivel redus de zgomot propriu, pentru instalații speciale de compresare și de decompresare a canalelor de legătură, cu un grad avansat de siguranță și fiabilitate. Unul dintre aceste blocuri, elaborat și construit în cadrul instituției menționate, a fost instalat la bordul aparatului de zbor personal al conducătorului statului sovietic. Au fost și alte destinații, nu mai puțin importante, dar care nici până în prezent nu au devenit cunoscute, nici cel puțin specialiștilor în materie (din cauza secretizării exagerate).

BIBLIOGRAFIE

- [1] Guțu V. *Filtre active RC. Monografie*. Editura „TEHNICA INFO”, Chișinău 2009.
- [2] Goroviț P, Hell W. *Arta schemotehnicii*. Editura „Mir”, Moscova, 1998.
- [3] Geli P.P. *Studierea caracteristicilor de zgomot ale filtrelor active RC*. Teza de doct.ș.t., IET Leningrad, 1973.
- [4] Guțu V. *Electronica. Dispozitive și circuite*. Editura „TEHNICA INFO”, Chișinău 2007.
- [5] Huilsman L. *Filtre active RC*. Editura „Mir”, Moscova 1968.
- [6] Guțu V. *Calculul zgomotului propriu al dispozitivelor și echipamentelor electronice (active RC filter, Sallen-Key's circuits)*. Proceeding of the 8th International Conference on Electromech. and Pow. Sys., SIELMEN 2011.
- [7] Guțu V. *Calculation of Devices and Equipment Electronics Own Noise (active RC filter, Raukh's circuits)*. Buletin AGIR, ANUL XVI, nr.4, ELS 2011, Suceava România, 2011.

Despre autor

Prof. Dr. ing., **Valentin GUȚU**
Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, R. Moldova

Absolvent al Institutului Politehnic din Leningrad (S. Peterburg) în 1969, specialitatea „Automatica, telemecanica și tehnica de calcul”. Doctorat susținut în „Microelectronică și schemotehnică” la Institutul Tehnic Electronic din Moscova, Federația Rusă. 35 de ani de activitate pedagogică, de cercetare și instruire în instituții de învățământ superior din Federația Rusă, Republica Moldova, România și Republica Mozambic; peste 80 de publicații cu caracter științific, de cercetare și metodico-didactic (monografie în sfera Radiotehnicii și Electronicii, manuale în Electrotehnică, Informatică și Electronică, culegeri de probleme și exerciții în Electrotehnică și Teoria Circuitelor Electrice, etc.).