

MĂSURAREA ZGOMOTULUI ELECTRONIC CA ELEMENT IMPORTANT AL TEHNOLOGIILOR AVANSATE



Valentin GUȚU, profesor universitar, doctor-inginer. Absolvent al Institutului Politehnic din S.Peterburg (Leningrad, 1969), specialitatea „Automatica, Telemecanica și Tehnica de calcul”, doctorat susținut la Institutul Tehnicii Electronice din Moscova (1974). 35 de ani de activitate pedagogică și de cercetare, peste 80 de publicații cu caracter științific și metodicodidactic.

Rezumat: În lucrare se argumentează alegerea procedurii de măsurare a zgomotului electronic prin metoda modulației. Este propusă și practic construită o instalație de măsurare a zgomotului propriu al amplificatoarelor operaționale – dispozitive, pe larg utilizate în cele mai diverse sfere și echipamente electronice și al filtrelor active *RC* în care acestea sunt utilizate ca element activ. Instalația funcționează în baza metodei modulației de măsurare, asigurând un grad de precizie suficient în practica inginerescă și, concomitent o sensibilitate satisfăcătoare în exerciții practice.

Cuvinte cheie. Zgomot, zgomot propriu, măsurarea zgomotului, metode de măsurare, caracteristici de zgomot, tensiune și putere, densitatea spectrală, generator de zgomot etalon, erori de măsurare, filtre, filtre active, funcția trece-jos, funcția trece-bandă, amplificator, amplificator operațional, detector.

Abstract: The paper argues the election process to measure electronic noise modulation method. It is proposed to virtually build a plant for measurement noise of the operational amplifiers – devices, widely used in various spheres and electronic equipment and of the active *RC* filters where these are used as active element. Facility operated by the modulation method of measuring, ensuring a sufficient degree of accuracy in engineering practice and while a satisfactory sensitivity in practical exercises

Key-words. Noise, own noise, noise measuring, measuring methods, noise characteristics, tension and power, spectral density, equivalent circuit, noise standard generator, measuring errors, filter, active filters, pass-low frequency function, pass-band frequency function, amplifier, operational amplifier, detector.

O metodă și o instalație de măsurare a zgomotului dispozitivelor și echipamentelor electronice

▪ **Introducere**

Investigarea și măsurarea proceselor fluctuante în general și a zgomotului propriu al echipamentelor electronice în particular, nu pot fi catalogate ca experiențe triviale. În procesul de măsurare a zgomotului apar o serie de dificultăți și complicații, ce țin de necesitatea stringentă de a înlătura total fenomenele colaterale sau factorii care ar limita sensibilitatea și ar înrăutăți exactitatea măsurărilor.

Sunt cunoscute mai multe metode și căi de măsurare a zgomotului. Metodei de măsurare a tensiunii sau puterii zgomotului este dedicată această lucrare. Foarte succint este expus procesul de elaborare a unei instalații speciale de măsurare a densității spectrale a tensiunii sau puterii zgomotului, analizată (și rezolvată) problema gradului de precizie a măsurărilor.

▪ **Procedee de măsurare ale tensiunii sau puterii zgomotului electronic**

În procesul de măsurare a zgomotului elementelor, dispozitivelor sau echipamentelor electronice pot prezenta interes diferiți parametri, introduși de diferiți autori, printre care: *densitatea spectrală* a tensiunii sau puterii zgomotului, *coeficientul* și *temperatura* zgomotului, *densitatea probabilității distribuirii* zgomotului, *funcția de autocorelare* etc. În această lucrare drept parametru sau caracteristică de bază în procesul de măsurare a zgomotului propriu (al *filtrelor active RC*) este aleasă densitatea spectrală a tensiunii sau puterii zgomotului, $S_U(f)$ respectiv $S_P(f)$, cu argumentele *pro-* acestei alegeri espuse în [1]. Din acest motiv, procesului de măsurare a coeficientului de zgomot și a altor caracteristici propuse de diferiți autori nu se acordă atenție aici.

În procesul de măsurare a densității spectrale a zgomotului amplificatoarelor operaționale (pe larg utilizate în echipamentele electronice ale *tehnologiilor avansate*) prezintă interes deosebit următorii parametri: punctul „frânturii” de jos al caracteristicii de frecvență, mai jos de care zgomotul cu spectrul $1/f$ (așa-zis zgomot *flicker*)

devine dominant [1]; zona spectrului „alb” în limitele căreia zgomotul este minim, relativ constant și determinat de componentele *termică* și *de alicie*; punctul „frânturii” de sus, peste care aportul componentelor de zgomot termic, de alicie și *flicker* devin insemnificative, iar dominant este *zgomotul de frecvență înaltă*. Există mai multe procedee (sau metode) de măsurare a zgomotului, care pot fi împărțite în două categorii mari: *analogice* și *digitale* (sau *nimerice*).

Metodele analogice de măsurare se bazează pe utilizarea filtrelor trece-bandă [1] cu o amplificare ulterioară, detectarea și medierea semnalului. Aceste metode au un dezavantaj care în anumite împrejurări poate deveni determinant: la frecvențe infrajoase devin inaplicabile din motive pur tehnice (este complicată realizarea filtrelor trece-bandă la astfel de frecvențe, iar mediерile la fiecare măsurare – foarte prelungite). Este adevărat că în cazul de față dezavantajul poate fi ușor depășit, deoarece nu-i nicio necesitate de a efectua măsurări într-un diapazon de frecvențe atât de jos; toate măsurările curente sunt limitate de jos cu frecvența 20 Hz, iar de sus – cu frecvența de 200 kHz. În acest diapazon de frecvențe utilizarea filtrelor active (FA-RC) este efectivă (până la 1 MHz).

Metodele numerice au apărut ca rezultat al utilizării tot mai ample a tehnicii de calcul și a metodelor computerizate de analiză a spectrului de zgomot într-o bandă largă de frecvențe, inclusiv și cele infrajoase. Alte detalii pot fi găsite în [2, 3].

În actuala lucrare a fost aleasă varianta *metodelor analogice* de măsurare. Printre metodele cunoscute de măsurare a tensiunii sau a puterii semnalelor fluctuante, cea mai largă răspândire au cunoscut: **metoda de comparare**; **metoda directă**; **metoda compensației** (reducerii la zero); **metoda de modulare**. În continuare nu vom intra în amănuntele tuturor metodelor, ne vom limita doar la ultima, aleasă – metoda modulării și iață de ce.

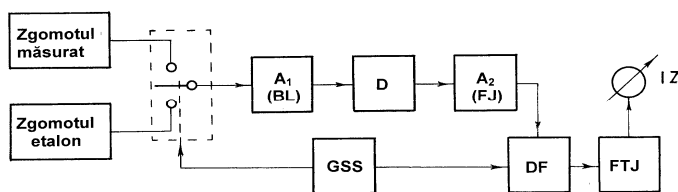


Fig.1. Metoda de măsurare prin modulare.

Metoda de măsurare prin modulare. În acest caz zgomotul de măsurat și zgomotul-etalon se supun modulației, după ce se aplică la intrarea unui receptor de tip superheterodină (figura 1). La ieșirea detectorului se obține un spectru neîntrerupt de zgomot, măsurat și etalon din care foarte simplu se selectează componenta cu frecvența de modulație; nivelul acestei componente este egal cu diferența dintre tensiunile (sau puterile) zgomotului măsurat și etalon. Este evident că dacă tensiunea (puterea) zgomotelor este egală, amplitudinea componente cu frecvența de modulare va fi egală cu zero. În acest moment se fixează tensiunea (puterea) zgomotului etalon, prin poziția acului aparatului de ieșire al generatorului și a atenuatoarelor corespunzătoare.

Frecvența de modulație a zgomotului de măsurat și cel etalon se alege, de regulă în limitele 20 – 30 Hz. Această metodă permite măsurarea puterii zgomotului până la valori de 10^{-15} – 10^{-16} W, cu o eroare de ± 10 %.[5].

De menționat că o direcție importantă în dezvoltarea tehnicii moderne de măsurări radio este automatizarea complexă a acestor procese. Utilizarea metodei de modulare permite accelerarea procesului de măsurare a zgomotului, prin comutarea automată a generatorului de zgomot etalon și majorarea sensibilității și gradului de precizie a măsurărilor, datorită câștigului ce revine din utilizarea detectoarelor coerente.

▪ **Elaborarea și construirea instalației de măsurare pe baza metodei modulării**

Comparând între ele diferite metode de măsurare a parametrilor zgomotului, se pot trage anumite concluzii, iar acestea pot sta la baza selectării metodei, utilizate pentru elaborarea instalației de măsurare. Cel mai simplu măsurarea tensiunii sau a puterii zgomotului se poate face prin metoda directă. Dar metoda are un dezavantaj serios – sensibilitată limitată, din cauza fluctuației coeficientului de transfer a amplificatorului; acest dezavantaj nu este depășit și în celelalte metode, mai complicate – metoda de comparație și metoda compensării [7].

În procesul de măsurare a nivelurilor scăzute de putere sau f.e.m. a zgomotului trebuie de ținut cont de zgomotul intern (propriu) al receptorului (amplificatorului, în primul rând) și de stabilizat, pe cât de posibil mai bine coeficientul de amplificare pe traseul de măsurare. Aceste probleme se impun cu o intensitate mai mică în cazul metodei de măsurare prin modulare (sau *comutare*), ceea ce se și demonstrează în această lucrare.

Intensitatea zgomotului măsurat la ieșire este determinată de mărimea componente cu frecvența de modulare, care poate depăși cu mult intensitatea zgomotului intern (propriu) al instalației. În instalație zgomotul studiat și cel etalon sunt modulate cu frecvența de 20 Hz. Or, această frecvență nu este luată întâmplător. În conformitate cu [5], durata cea mai scurtă de realizare a unui proces aleatoriu $u(t)$ (în cazul nostru – tensiunea zgomotului) ce asigură măsurarea valorii medii a unei componente de zgomot cu eroarea δ_z poate fi calculată astfel:

$$T \geq 1/2 \delta_z^2 f_z (U_{ef} / U_{med})^2, \quad (1)$$

unde f_z este frecvența componente respective a zgomotului, [Hz];

U_{ef} / U_{med} – raportul valorilor efectivă și medie a tensiunii zgomotului, [V].

Măsurarea zgomotului propriu în cazul filtrelor active RC s-a făcut în diapazonul de frecvențe 20 Hz ÷ 200 kHz. Prin urmare, în alegerea celei mai scurte durate de realizare T trebuie de ținut seama de necesitatea măsurării cu o eroare prescrisă ($\delta_z \leq 20\%$) a componentei de zgomot cu frecvența $f_z = 20$ Hz. Dacă în formula (1) înlocuim δ_z și f_z cu valorile indicate, în plus mai ținem socoteala că raportul U_{ef} / U_{med} pentru un proces aleatoriu este de $\sim 1,2$ se obține $T \geq 0,9$ s. Alegând $T = 1$ s, măsurând componenta de zgomot cu frecvența $f_z = 20$ Hz trebuie de asigurat o frecvență de comutație (modulare) $f_{mod} \leq 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot f_z$. În instalație sunt prevăzute două regimuri de măsurare, cu două frecvențe de modulație: $f_{mod1} = 0,5$ Hz pentru măsurarea componentelor de zgomot cu frecvența 20, 50 și 100 Hz și $f_{mod2} = 20$ Hz – pentru măsurări la frecvențe de 200 Hz și mai mult. Alegerea frecvențelor care ar fi peste 20 Hz nu conduce la careva performanțe și din punct de vedere tehnic nu este justificată. Dacă frecvența în cauză este aproape de 50 Hz, apare pericolul creșterii erorii, pe socoteala influenței rețelei electrice de alimentare. În urma comutației cu frecvența 20 Hz, la ieșirea detectorului (**D**) se obține un spectru continuu de zgomot, măsurat și etalon, în nemijlocită apropiere de frecvența nulă. Din acest spectru, cu ajutorul detectorului de fază este desprinsă componenta cu frecvența principală de modulație. Valoarea acestei componente, percepută de indicator este proporțională diferenței puterilor zgomotului măsurat și etalon. Măsurarea amplitudinii componente cu frecvența modulației corespunde măsurării diferenței de energii ale surselor fluctuante menționate. Metoda de măsurare în acest caz poartă denumirea citire nemijlocită, spre deosebire de metoda de măsurare cu citire în zero, aceasta fiind de preferat – aparatele și instalațiile ce funcționează pe acest principiu sunt mai precise decât cele analoage care funcționează în baza metodei de comutare cu citire nemijlocită; motivul – micșorarea greșelii pe contul erorii instrumentale a aparatului de măsurat. Instalația a fost construită în baza metodei de măsurare prin comutație, mai precisă și asigurând o sensibilitate mai înaltă (figura 1). În procesul elaborării instalației, pe lângă scopul de bază – obținerea sensibilității și exactității dorite – exista și altul, paralel: utilizarea, pe cât de posibil a aparatelor de producție în serie industrială și reducerea la minim a ansamblurilor și subansamblurilor nonstandard. Aceasta permite, relativ ușor și rapid asamblarea instalației atât în condiții de laborator, cât și de producție. Rolul blocurilor din figura 2:

Amplificator și detector. Atunci când trebuie de măsurat niveluri de tensiune sau putere foarte reduse, apare necesitatea amplificării zgomotului. Dacă se măsoară puterea zgomotului, indicațiile măsurătorului trebuie să fie proporționale puterii zgomotului la intrare, ceea ce poate avea loc numai în cazul când curentul de ieșire a detectorului este proporțional puterii de la intrare; această condiție poate fi respectată, doar dacă este liniară caracteristica amplificatorului și *parabolică* – cea a detectorului. Deși această combinație este de dorit, ea nu este absolut necesară; fiind luate anumite măsuri, poate fi utilizat un amplificator cu un grad de liniaritate nu neapărat performant și orice detector cu caracteristica...nu chiar întocmai parabolică. Obligatoriu este numai ca măsurătorul de ieșire să fie calibrat în unități de putere a zgomotului la ieșire; această calibrare și controlul respectiv se pot face cu ajutorul diodei de zgomot [4]. Dacă se măsoară tensiunea zgomotului, se utilizează amplificatorul liniar în combinație cu un detector la fel liniar ceea ce conduce la o ameliorare a stabilității și sensibilității măsurărilor.

O particularitate a instalației de măsurare constă în faptul că trebuie de măsurat nu numai valoarea integrală a tensiunii sau a puterii zgomotului, ci și densitatea spectrală a tensiunii $S_U(f)$ și a puterii $S_P(f)$ zgomotului, or aceasta înseamnă că trebuie prevăzută posibilitatea reacordării în frecvență. În acest scop, la măsurarea $S_U(f)$ a elementelor active (amplificatoare operaționale, în cazul FA-RC) este utilizat ca amplificator și ca filtru trecebandă (TB) reacordabil voltmetrul selectiv V6-2, cu factorul de calitate $Q \cong 10$, cu banda de trecere $\Delta f \cong (0,1 - 0,2)f_0$, unde f_0 este frecvența de racordare a circuitului oscilant de intrare.

Modulatorul și amplificatorul de frecvență joasă. Modulatorul este unicul element (subansamblu) nestandard (figura 2). În radiometrele moderne (măsurătoare de puteri mici) modulația cu frecvență joasă (sau poate mai corect – manipulația) a zgomotului de măsurat și etalon se face cu ajutorul comutatorului din ferită, se utilizează o acționare mecanică, sau prin conectarea și deconectarea periodică a tensiunii de alimentare [5]. Toate aceste variante de modulație sunt sau practic neaplicabile, sau insuficient de eficace în cazul măsurărilor în diapazonul frecvențelor joase sau sonore. Pentru această instalație de măsurare a fost construit un modulator în baza unui *trigger* static în combinație cu un releu electromecanic. *Trigger*-ul este comandat de generatorul de frecvență a modulației (**GSS** – generator de semnal standard), care sincronizează funcționarea modulatorului (**M**) și a detectorului de fază (**DF**, figura 1). A fost deja menționat că în cazul măsurărilor prin metoda modulației este necesar ca din spectrul de ieșire a detectorului să se selecteze componenta cu frecvența de modulație, amplitudinea căreia este proporțională cu diferența intensităților zgomotului măsurat și etalon. Această sarcină îi revine amplificatorului măsurător U2-6, în regimul „Îngustă-2”, cu banda de trecere la nivelul $0,7 \Delta f \cong 1$ Hz.

FTJ, detector de fază și nul-organ. Un moment important în procesul de măsurare a zgomotului prin metode analogice este durată unei lecturi de zgomot. Alegerea timpului de stabilire a valorii medii (sau timpului de mediere) se face cu ajutorul unui filtru RC de frecvență joasă (FTJ), la ieșire. Constanta de timp a filtrului se alege

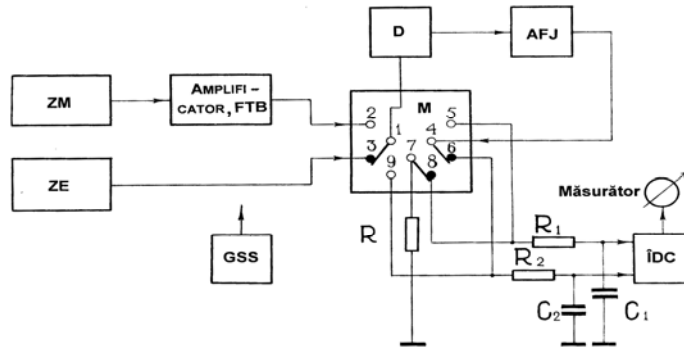


Fig.2. Schema principială a instalației de măsurare.

în conformitate cu cerința față de precizia unei lecturi de zgomot, aceasta fiind egală cu $1/\sqrt{2B\tau}$, unde B este banda semnalului de zgomot. În figura 2 este dată schema bloc a instalației, unde modulatorul este prezentat doar prin contactele sale, pentru simplificări nu este legat și generatorul de pornire (GSS). În această schemă sunt arătate elementele RC ale filtrului FTJ care, împreună cu contactele releului indeplinesc concomitent și funcțiile detectorului de fază. Pe condensatoarele C_1 și C_2 se obține un semnal mediu proporțional intensității zgomotului studiat și etalon. Acest semnal se aplică la intrarea dispozitivului de însumare, la ieșirea căruia este conectat indicatorul de zero. În cazul egalității semnalelor, la ieșirea dispozitivului de însumare se obține $U_{ies} = U_{C1} - U_{C2} = 0$ ce și fixează indicatorul. Elementele RC se iau: $R_1 = R_2 = R$ și $C_1 = C_2 = C$. Ca dispozitiv de însumare și nul-organ este utilizat înregistratorul potențimetric în două coordonate PDS-021M (ÎDC).

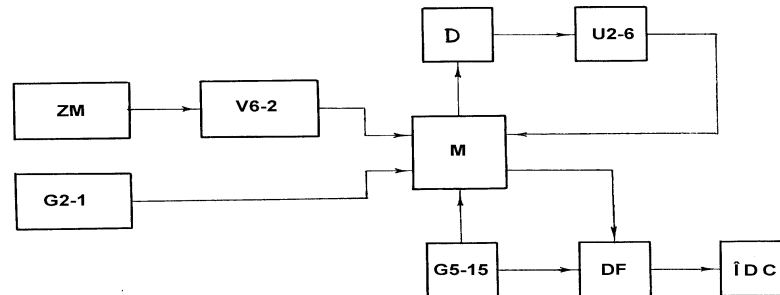


Fig. 3. Instalația de măsurare a densității spectrale a zgomotului după metoda modulației.

Schema bloc definitivă a instalației de măsurare a zgomotului prin metoda modulației este prezentată în figura 3. Aici (amintim): **M** – modulatorul; **D** – detectorul; **DF** – detectorul de fază; **ZM** – zgomotul măsurat; **G2-1** – generator zgomot etalon; **G5-15** – generator frecvență de modulație; **V6-2** – voltmetru selectiv; **U2-6** – amplificator de măsurare; **PDS-021M** – înregistrator în două coordonate (în schema din figura 2 și 3 - ÎDC).

Surse de alimentare și problemele de ecranare. Pentru a elimina influența modificării (oscilației) tensiunii surselor de alimentare asupra rezultatelor de măsurare a zgomotului, toată alimentarea se efectuează de la baterii și acumuloare bine ecranate. Este prevăzută blocarea intrării detectorului (prin scurtcircuitare la masă) în clipa porniri și conectării tensiunii de alimentare, pentru a diminua durata proceselor tranzitorii și a exclude oscilațiile nedorite a acului aparatului de măsurare. În final, încă o condiție care trebuie neapărat respectată, pentru a petrece cu succes experimentul: asigurarea unei „mase” bune! O „masă” rea prezintă o albă convenabilă pentru tot felul de interferențe și ce mai neplăcută și dăunătoare – bruiatul de 50 Hz, lupta împotriva căruia cere mobilizare de măsuri și mijloace suplimentare (utilizarea filtrelor-rejector, pentru suprimarea armonicilor 1 și 2 ale rețelei de alimentare). Cuplările interaparate s-au făcut cu cablu coaxial ecranat, iar elementele nestandarde (modulator, filtre etc.) au fost instalate într-o carcasă de protecție împotriva undelor electromagnetice și câmpurilor electrostatice, la rândul ei conectată la o „masă” sigură.

▪ Evaluarea rezultatelor de măsurare

Ca măsurările să fie credibile este necesară evaluarea prealabilă a **sensibilității** instalației și a **erorii** de măsurare. **Sensibilitatea instalației.** Sensibilitatea instalației de măsurare ce funcționează în baza metodei modulației poate fi evaluată prin valoarea minimă a diferenței $(P_{ZE} - P_{ZM})_{min}$, sub influența căreia acul aparatului de măsurare deviază, proporțional valorii medii a oscilațiilor lui, doar sub influența zgomotului traseului de măsurare. Sensibilitatea de limită poate fi evaluată conform unei expresii simple [4]:

$$(P_{ZE} - P_{ZM})_{min} \cong P_{Zint} \sqrt{\frac{\Delta\Omega}{\Delta f}}, \quad (2)$$

unde P_{ZE} este puterea zgomotului etalon;

- P_{ZM} – puterea zgomotului de măsurat;
 P_{Zint} – puterea zgomotului propriu al amplificatorului de măsurare (U2-6);
 $\Delta\Omega$ – banda de trecere a FTJ;
 Δf – banda de zgomot a voltmetrului selectiv (V6-2).

Din expresia de mai sus se vede clar că sensibilitatea instalației este determinată de nivelul zgomotului propriu al aparatelor utilizate și într-o măsură mai mică – de banda de trecere a filtrului trece-jos (FTJ).

Eroarea de măsurare a instalației. Precum bine se știe, în urma măsurării parametrilor, a caracteristicilor și proprietăților semnalelor și mărimilor, determinate sau aleatorii nu se obțin valorile adevărate și pure, ci valori approximate cu un anumit grad de exactitate. Aceasta se explică atât prin constrângeri principiale – nonperformanța metodelor și mijloacelor, cât și prin natura proprie a obiectelor de măsurat. Densitatea spectrală a tensiunii zgomotului studiat poate fi prezentată în felul următor:

$$S_U(f) = S_{ET}(f) \cdot \left(\frac{K_{AT}}{K_{AN}} \right)^2, \quad (3)$$

unde $S_{ET}(f)$ este densitatea spectrală a tensiunii de zgomot, aplicată la intrarea instalației de măsurare, de la generatorul de zgomot etalon; K_{AT} este coeficientul de transfer al atenuatorului, după care se face lectura semnalului de ieșire al generatorului G2-1; K_{AN} este coeficientul de transfer al amplificatorului prealabil cu nivel scăzut de zgomot. Ținând cont de expresia (3), eroarea relativă a instalației poate fi prezentată astfel [5]:

$$\delta_1 = \frac{\Delta S_{ET}}{S_{ET}} + 2 \left(\left| \frac{\Delta K_{AT}}{K_{AT}} \right| + \left| \frac{\Delta K_{AN}}{K_{AN}} \right| \right). \quad (4)$$

În eroarea δ_1 se ține socoteala de eroarea instalației și a lecturii zgomotului, introduse de generatorul de zgomot G2-1. Pentru a determina eroarea sumară a măsurărilor trebuie de luat în seamă și greșeala legată de timpul limitat și imprecizia efectuării operației de însumare (mediere). Totodată poate fi utilizată expresia pentru evaluarea erorii de măsurare, determinată de finitudinea timpului de mediere [6]:

$$\delta_2 = 1 / \sqrt{2f\tau}. \quad (5)$$

Eroarea operației de mediere apare din cauza că nu se respectă suficient de strict condiția: $\tau_1 = \tau_2 = \tau$, unde $\tau_1 = R_1C_1$ și $\tau_2 = R_2C_2$.

Dar...deoarece valorile nominale ale elementelor R_1 și R_2 , C_1 și C_2 pot fi selectate suficient de precis (nu mai rău decât cu eroarea de $\pm 1,0\%$), eroarea δ_2 poate fi ignorată, fără careva prejudicii semnificative.

Mărimea erorii sumare a instalației este influențată și de finitudinea benzii de trecere (B). Deși această influență nu se manifestă în modul direct asupra măsurărilor, totuși la o valoare mare B , instalația va măsura densitatea spectrală mediată în această bandă fiind proporțională ei. Valoarea măsurată coincide exact cu cea adevărată în cazul dacă densitatea spectrală nu depinde de frecvență, în limitele benzii de trecere B . În [7] este demonstrat că eroarea relativă pe contul finitudinii benzii de trecere poate fi calculată ca

$$\delta_3 = B/2f. \quad (6)$$

Eroarea sumară a instalației de măsurare trebuie să includă și greșeala provocată de instabilitatea coeficientului de amplificare a amplificatorului U2-6 (amplificator de frecvență joasă):

$$\delta_4 = \left| \Delta K_{AFJ} / K_{AFJ} \right|. \quad (7)$$

Semnalul „zgomotos”, detectat și mediat și care se aplică la intrarea dispozitivului indicator, conține și zgomotul de frecvență joasă; acest zgomot provoacă oscilații ale acului indicatorului în preajma unei valori medii (sau nule). Eroarea relativă cauzată de indicator poate fi calculată, ca:

$$\delta_5 = \left| B \tau_{in} / 2 \right|, \quad (8)$$

unde τ_{in} este constanta de timp a indicatorului.

În final, eroarea sumară a instalației de măsurat se calculează astfel:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \delta_i^2}. \quad (9)$$

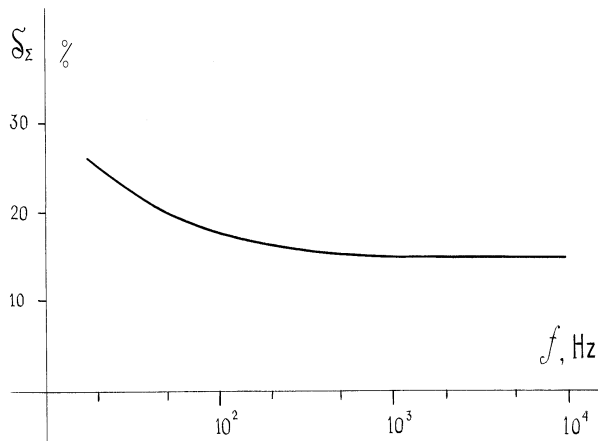


Fig.4. Dependenta erorii instalației de frecvență.

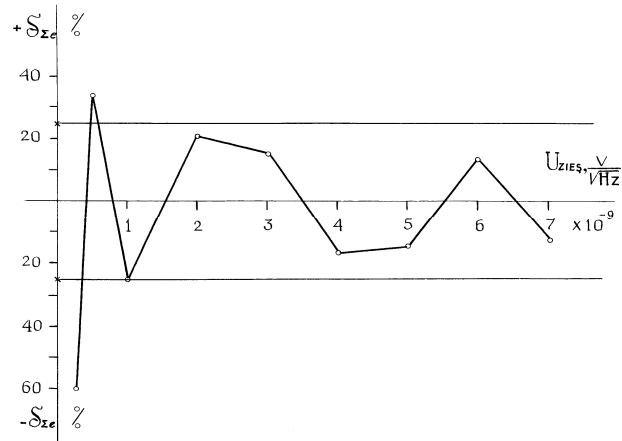


Fig.5. Dependenta erorii instalației de nivelul semnalului de intrare.

În relația (9) termenii sumei $\delta_1, \delta_3, \delta_4, \delta_5$ alcătuiesc eroarea de aparat, iar δ_2 – eroarea de metodă a instalației de măsurare. Luând în considerare erorile aparatelor de măsurare utilizate și eroarea metodei de modulație, componentele din (9) au valorile: $\delta_1 \cong 10\%$; $\delta_2 = 20\%$; $\delta_3 = 10\%$; $\delta_4 = 3\%$; $\delta_5 = 5\%$. Substituind aceste valori în (9), se obține valoarea erorii sumare maxime a instalației de măsurare, egală cu $\delta_z = 25\%$ (figura 4).

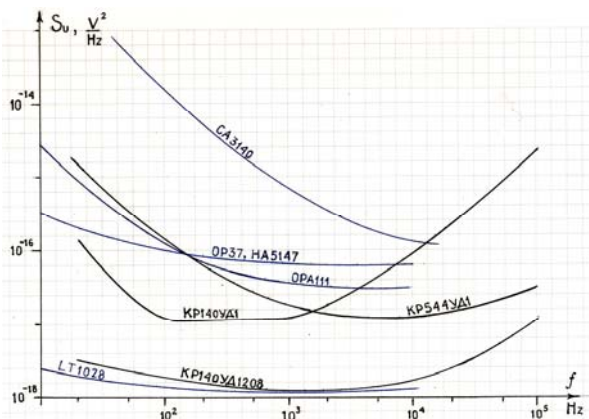


Fig.6. Densitatea spectrală a tensiunii de zgomot a unor amplificatoare operaționale.

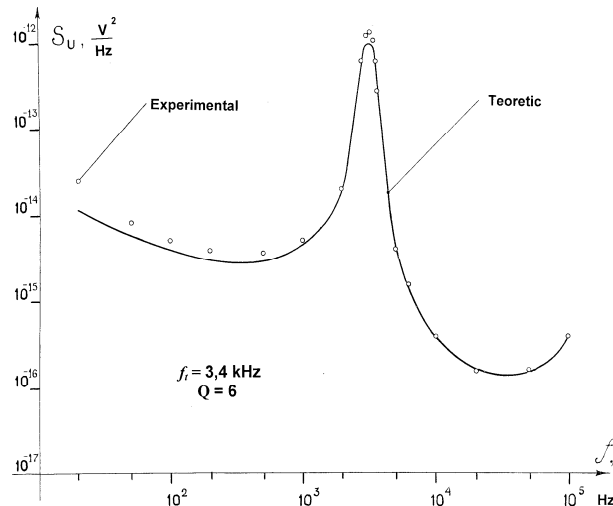


Fig.7. $S_U = \varphi(f)$, FTJ Sallen-Key.

În figurile de mai sus sunt reprezentate rezultate de măsurare a densității spectrale a tensiunii de zgomot a unor amplificatoare operațională de producție ex-sovietică și occidentale (*Fairchild Camera and Instrument Corp., Toyo-Rohn, Tochiba* etc.), figura 6 și a unui filtru activ RC în baza binecunoscutei scheme Sallen-Key care realizează funcția trece-jos (FTJ), figura 7.

Literatura de referință

1. Guțu V. *Filtre Active-RC*. Monografie, Editura „TEHNICA INFO”, Chișinău 2009.
2. Smith L. and Sheingold D. *Noise and operational amplifier circuits*. „Analogique Revises”, volume 3, March 1968.
3. Blacman R.B., Tukey J.W. *The measurement of power spectral from the point of Vien in communication engeneering*. „Bell Syst. Jech.J”, volume 37, 1968.
4. Тетерич Н.М. *Генераторы шума и измерение шумовых характеристик*. Изд. «Энергия». М. 1972.
5. Ван Дер Зил. *Шумы. Источники, описание, измерение*. Издательство «Наука», Новосибирск 1976.
6. Вентцель Е.С. *Теория вероятностей*. ГИФМЛ, 1958.
7. Кендал М., Стьюарт А. *Теория распределений*. Издательство «Наука», Москва 1966.