

## **LUCRARE DE LABORATOR LAB-01**

# **AMPLIFICATOARE DE MĂSURARE FĂRĂ IZOLARE GALVANICĂ – Partea I –**

Autor: Conf.dr.ing. Constantin Harja

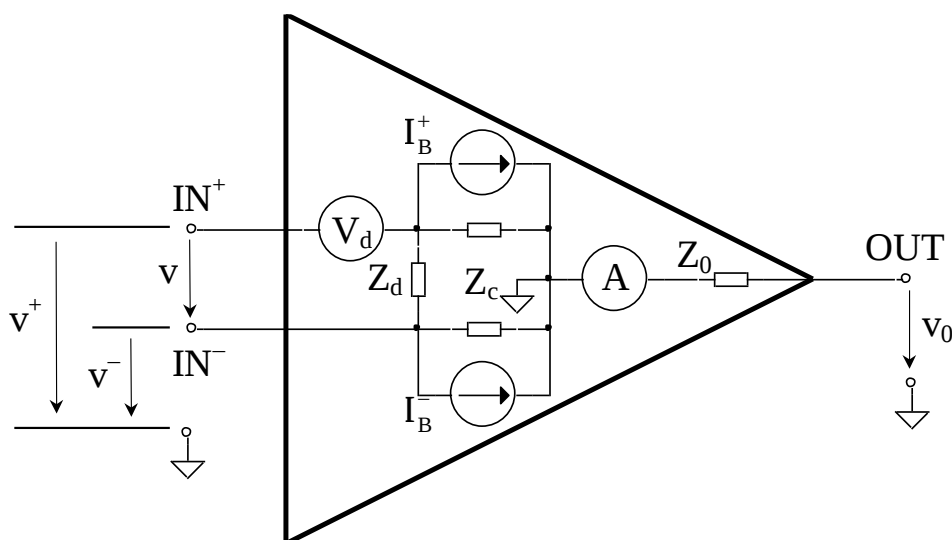
## **1. SCOPUL LUCRĂRII**

Scopul prezentei lucrări este studierea și testarea amplificatorului instrumental. Analiza acestui tip de amplificator se efectuează prin comparație cu amplificatorul diferențial prevăzut cu repetoare de tensiune la intrare, pentru a se pune în evidență creșterea performanțelor antiperturbative ale amplificatorului instrumental.

## **2. CARACTERISTICI ELECTRICE GENERALE ALE AMPLIFICATOARELOR DE MĂSURARE**

- 1.1. Intervalul de variație a tensiunii diferențiale de intrare –  $\Delta V_i$ : max.  $\pm 10$  V.
- 1.2. Impedanța diferențială de intrare –  $Z_{id}$ :  $10^8 \dots 10^{12} \Omega$ .
- 1.3. Impedanța de intrare de mod comun –  $Z_{ic}$ :  $10^9 \dots 10^{12} \Omega$ .
- 1.4. Curentul de polarizare la intrare –  $I_B$ : 0,003...200 nA.
- 1.5. Tensiunea de decalaj la intrare –  $V_d$ : 0,005...8 mV.
- 1.6. Curentul de decalaj la intrare –  $I_d$ :  $(0,1 \dots 0,5)I_B$ .
- 1.7. Coeficientul de variație cu temperatura a tensiunii de decalaj la intrare –  $\alpha_{vd}$ : 0,25...50  $\mu V/^\circ C$ .
- 1.8. Factorul de amplificare –  $A$ :  $1 \dots 10^4$ .
- 1.9. Neliniaritatea –  $\epsilon$ : 0,002...0,02 %.
- 1.10. Raportul de rejecție a tensiunilor de mod comun – **RRMC**: 80...120 dB.
- 1.11. Intervalul de variație a tensiunii de ieșire –  $\Delta V_0$ : max.  $\pm 10$  V.
- 1.12. Curentul de ieșire –  $I_0$ : max. 5...10 mA.
- 1.13. Impedanța de ieșire –  $Z_0$ : 10...2000 m $\Omega$ .
- 1.14. Frecvența de tăiere –  $f_T$ : 1kHz...40 MHz.

În general, parametrii electrici ai unui amplificator de măsurare sunt similari celor ai unui amplificator operațional obișnuit. Semnificația parametrilor  $Z_{id}$ ,  $Z_{ic}$ ,  $I_B$ ,  $V_d$ ,  $A$ ,  $Z_0$ , rezultă din schema echivalentă în regim static, reprezentată în Fig.1.



**Fig.1. Schema echivalentă a unui amplificatorului de măsurare**

Din punct de vedere constructiv, un amplificator de măsurare poate fi realizat sub formă de circuit integrat sau sub formă de circuit hibrid.

Amplificatoarele de măsurare pot avea la intrare tranzistoare bipolare, tranzistoare super- $\beta$  sau tranzistoare cu efect de câmp. Amplificatoarele de măsurare prevăzute la intrare cu tranzistoare cu efect de câmp se remarcă prin curenți de polarizare mici, deci impedanță de intrare ridicată, însă, ca dezavantaj, prezintă tensiuni de decalaj la intrare și coeficienți de variație cu temperatura ai tensiunii de decalaj și curenților de intrare, mai mari. Performanțe optime oferă amplificatoarele de măsurare care au la intrare tranzistoare super- $\beta$ .

Curentul de polarizare este dat de următoarea relație:

$$I_B = \frac{1}{2}(I_B^+ + I_B^-), \quad (1)$$

iar curentul de decalaj la intrare este dat de relația:

$$I_d = |I_B^+ - I_B^-| = (0,1...0,5)I_B. \quad (2)$$

Unele cataloage specifică și coeficientul de variație cu temperatura al curentului de decalaj –  $\alpha_{Id}$  [pA/°C]. De asemenea, pentru caracterizarea comportării în regim dinamic mai pot fi specificați și următorii parametri:

- viteza de variație a tensiunii de ieșire (*Slew-Rate*) –  $SR$  [V/μs];

- timpul de stabilizare, definit ca timpul după care abaterea tensiunii de ieșire, pentru semnal treaptă la intrare, față de valoarea de regim staționar are o anumită valoare bine precizată (1, 0,1, 0,01%).

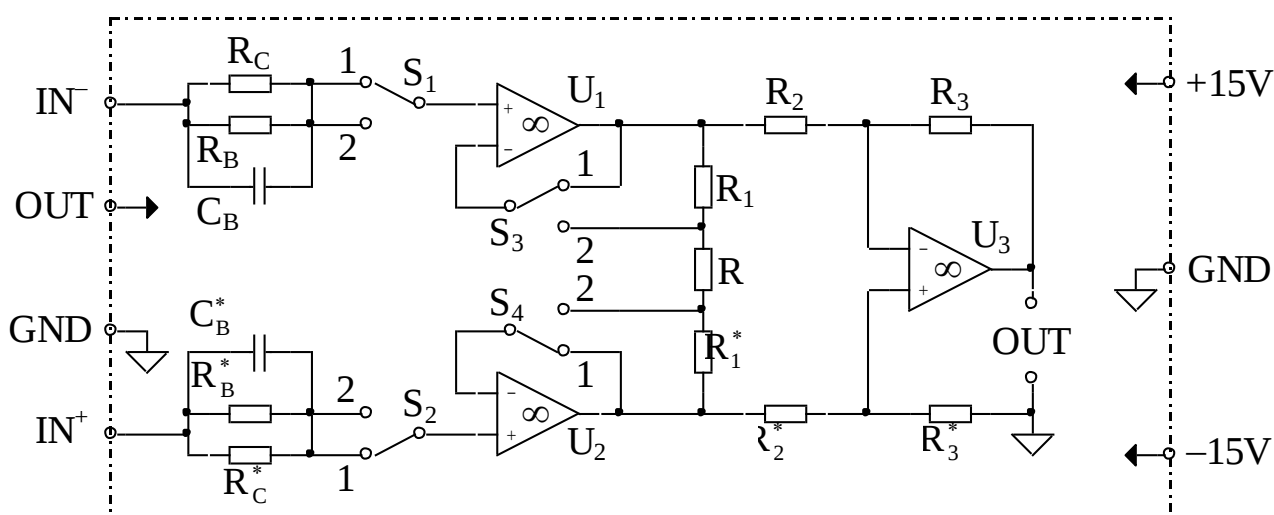
De obicei, amplificatoarele de măsurare se utilizează la măsurarea tensiunilor continue sau lent variabile. Performanțele în regim dinamic interesează mai ales când se măsoară semnale rapid variabile sau semnale lent variabile în puncte multiple.

Un criteriu de bază pentru clasificarea amplificatoarelor de măsurare este tipul reacției negative interne. Din acest punct de vedere, se realizează amplificatoare de măsurare cu reacție negativă de curent și amplificatoare de măsurare cu reacție negativă de tensiune. În prezenta lucrare de laborator se studiază două variante de amplificatoare de măsurare din ultima categorie, realizate cu componente discrete.

### 3. SCHEMA ELECTRICĂ A AMPLIFICATORULUI DE MĂSURARE

Amplificatorul *instrumental*, *instrumentațional* sau *de măsurare propriu-zis*, este un ansamblu constituit din amplificatoare diferențiale realizate cu rețele de rezistențe de precizie, calibrate și stabile. În afară de acesta se mai utilizează și amplificatorul diferențial prevăzut cu repetoare de tensiune la intrare.

Schema electrică a machetei de laborator utilizată pentru studiul amplificatorului de măsurare este reprezentată în Fig.2.



**Fig.2. Schema electrică a machetei de laborator**

Componentele electronice din structura amplificatorului au valorile:

- $R_B, R_B^* = 100 \text{ k}\Omega \pm 1\%$ ;  $R_C, R_C^* = 1 \text{ k}\Omega \pm 1\%$ ;  $C_B, C_B^* = 100 \text{ nF}$ ;
- $R_1, R_1^* = 5 \text{ k}\Omega \pm 0,25\%$ ;  $R = 1 \text{ k}\Omega \pm 0,25\%$ ;
- $R_2, R_2^* = 10 \text{ k}\Omega \pm 0,25\%$ ;  $R_3, R_3^* = 100 \text{ k}\Omega \pm 0,25\%$ ;

iar raportul de rejecție a modului comun al  $U_1, U_2, U_3$  are valoarea  $RRMC_U = 80 \text{ dB}$ .

Rezistențele  $R_C, R_C^*$  au rol de limitare a curenților de intrare, în scop de protecție la depășirea tensiunii nominale de intrare, rezistențele  $R_B, R_B^*$  sunt utilizate pentru măsurarea curenților de intrare și a rezistenței diferențiale de intrare, iar condensatoarele  $C_B, C_B^*$  filtrează zgomotului rezistențelor  $R_B, R_B^*$ .

Macheta de laborator permite studiul a două tipuri de amplificatoare de măsurare, configurate cu ajutorul comutatoarelor  $S_3$  și  $S_4$ :

- (a) – pentru  $S_3, S_4 = 1$ ,  $U_1$  și  $U_2$  funcționează în regim de repetor, iar  $U_3$  în regim de amplificator diferențial, deci amplificatorul de măsurare este de tipul *amplificator diferențial cu impedanță de intrare simetrică și de valoare ridicată* (rezistențele  $R_1, R, R_1^*$  nu intervin în calculul amplificării, constituind doar o sarcină suplimentară pentru repetoare);
- (b) – pentru  $S_3, S_4 = 2$ ,  $U_1$  și  $U_2$  constituie un etaj de amplificare simetric, iar  $U_3$  un etaj de amplificare diferențial, rezultând schema de bază a unui *amplificator de măsurare propriu-zis, numit și amplificator instrumental*.

Raportul de rejecție a modului comun –  $RRMC$  este definit, în general, astfel:

$$RRMC = 20 \log \frac{V_{mc}}{V_{dc}}, \quad (3)$$

unde  $V_{mc}$  este tensiunea de mod comun, iar  $V_{dc}$  este o tensiune echivalentă (diferențială) de intrare care ar produce asupra amplificatorului același efect ca și tensiunea de mod comun.

În cazul unui amplificator, având în vedere că:

$$A_d = \frac{V_0}{V_{dc}}, \quad A_c = \frac{V_0}{V_{mc}}, \text{ rezultă } RRMC = 20 \log \frac{A_d}{A_c}, \quad (4)$$

unde  $V_0$  este tensiunea de ieșire,  $A_d$  este amplificarea pe mod diferențial, iar  $A_c$  este amplificarea pe mod comun.

Pentru varianta (a) a amplificatorului de măsurare, tensiunea de ieșire –  $v_{0a}$  și factorul de amplificare –  $A_a$  sunt date de următoarele relații:

$$v_{0a} = \frac{R_3}{R_2} (v_i^+ - v_i^-) = A_a (v_i^+ - v_i^-), \text{ unde } A_a = \frac{R_3}{R_2}. \quad (5)$$

Raportul de rejecție a modului comun –  $RRMC_a$  pentru această variantă a amplificatorului are o componentă dependentă de  $RRMC$  al circuitului  $U_3$  –  $RRMC_U$ , fiind egală cu  $RRMC_U$  și alta dependentă de împerecherea rezistențelor din rețeaua de reacție ( $R_2/R_2^*$  și  $R_3/R_3^*$ ) –  $RRMC_R$ , calculându-se cu relațiile:

$$\frac{1}{RRMC_a} = \frac{1}{RRMC_U} + \frac{1}{RRMC_R}, \quad RRMC_U = 80\text{dB}, \quad RRMC_R \approx 20\log \frac{1+A_a}{2\delta}, \quad (6)$$

unde  $\delta$  este eroarea relativă a factorului de amplificare  $A_a$ :

$$\delta = \frac{\Delta A_a}{A_a} = \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_2}{R_2} = 2 \frac{\Delta R}{R} = 2\varepsilon_R, \quad (7)$$

iar  $\Delta R/R = \varepsilon_R$  reprezintă eroarea relativă a rezistențelor din rețeaua de reacție.

Pentru varianta (b) a amplificatorului de măsurare, tensiunea de ieșire –  $v_{0b}$  și factorul de amplificare –  $A_b$  sunt date de relațiile:

$$v_{0b} = \frac{R_3}{R_2} \left(1 + \frac{2R_1}{R}\right) (v_i^+ - v_i^-) = A_b (v_i^+ - v_i^-), \quad \text{unde} \quad A_b = \left(1 + \frac{2R_1}{R}\right) A_a, \quad (8)$$

iar raportul de rejecție a modului comun –  $RRMC_b$  are expresia:

$$RRMC_b = \left(1 + \frac{2R_1}{R}\right) RRMC_a \quad \text{sau} \quad RRMC_b = 20\log \left(1 + \frac{2R_1}{R}\right) + RRMC_a [\text{dB}]. \quad (9)$$

Acest rezultat apare fiindcă amplificarea etajului de intrare ( $U_1$ ,  $U_2$ ) are valoarea  $(1+2R_1/R)$  pe mod diferențial, iar pe mod comun are valoare unitară.

$RRMC$  constituie un parametru esențial al unui amplificator de măsurare. Neglijând efectul neîmperecherii rezistențelor din rețeaua de reacție, amplificatorul diferențial – (a) are  $RRMC$  egal cu cel al amplificatorului operațional utilizat, iar amplificatorul instrumental – (b) are  $RRMC$  multiplicat cu factorul de amplificare al etajului de intrare. Această situație rămâne neschimbată și dacă se ia în considerare efectului neîmperecherii rezistențelor din rețeaua de reacție a amplificatorului diferențial. De regulă, efectul neîmperecherii rezistențelor are pondere mai mare decât  $RRMC$  al amplificatoarelor operaționale utilizate, în limitarea globală a  $RRMC$ .

## 4. PROBLEME TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE

### 4.1. MĂSURĂRI ÎN CURENT CONTINUU

**4.1.1. Se analizează schemele electrice ale celor două variante de amplificator de măsurare și se deduc (5) și (8).**

**Observație:**

Întreg setul de măsurări se efectuează pentru fiecare din cele două variante ale amplificatorului de măsurare, începându-se cu varianta (a) ( $S_3, S_4 = 1$ ) și continuând apoi cu varianta (b) ( $S_3, S_4 = 2$ ). Pentru simplificarea notațiilor, se renunță la indicele de desemnare a variantei amplificatorului de măsurare.

**4.1.2. Măsurarea tensiunii echivalente de decalaj la intrare:**

- se calculează valoarea factorului de amplificare –  $A$ , cu (5) sau (8), în funcție de valorile rezistențelor (pct.3);
- se poziționează  $S_1, S_2 = 1$ ;
- se conectează ambele intrări ale amplificatorului de măsurare la masă și se măsoară cu un voltmetru numeric tensiunea de decalaj la ieșire –  $V_{d0}$ ;
- se calculează tensiunea echivalentă de decalaj la intrare:

$$V_{di} = \frac{V_{d0}}{A}. \quad (10)$$

**4.1.3. Măsurarea erorii de neliniaritate:**

- se păstrează  $S_1, S_2 = 1$ ;
- se calculează valoarea nominală a tensiunii de intrare –  $V_{in}$ :

$$V_{in} = \frac{10V}{A}; \quad (11)$$

- se conectează una din intrările amplificatorului de măsurare la masă iar la cealaltă se aplică o tensiune continuă, măsurată cu un voltmetru numeric, cu următoarele valori discrete:  $v_{ik} = (0,25, 0,5, 0,75, 1)V_{in}$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ );
- se măsoară valorile tensiunii de ieșire –  $v_{0k}^*$ , corespunzătoare valorilor tensiunii de intrare ( $v_{ik}$ ), din care se scade tensiunea de decalaj, rezultând:

$$v_{0k} = v_{0k}^* - V_{d0}; \quad (12)$$

- se calculează factorul de amplificare măsurat –  $A_0$ , în punctul corespunzător capătului gamei dinamice ( $v_{i4} = V_{in}, v_{04}$ ):

$$A_0 = \frac{v_{04}}{v_{i4}}; \quad (13)$$

- se calculează ordonatele punctelor de pe caracteristica ideală de transfer (în sensul de liniară) –  $v_{0k}^\circ$ :

$$v_{0k}^\circ = A_0 v_{ik}; \quad (14)$$

- se calculează abaterea dintre caracteristica de transfer reală și ideală:

$$\Delta v_{0k} = v_{0k} - v_{0k}^{\circ}; \quad (15)$$

- se calculează eroarea de neliniaritate –  $\varepsilon_n$ , cu relația:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta v_{0\max}}{v_{0\max}^{\circ}} \cdot 100[\%]; \quad (16)$$

- datele experimentale se trec în două tabele corespunzătoare celor două variante ale amplificatorului de măsurare, conform modelului următor:

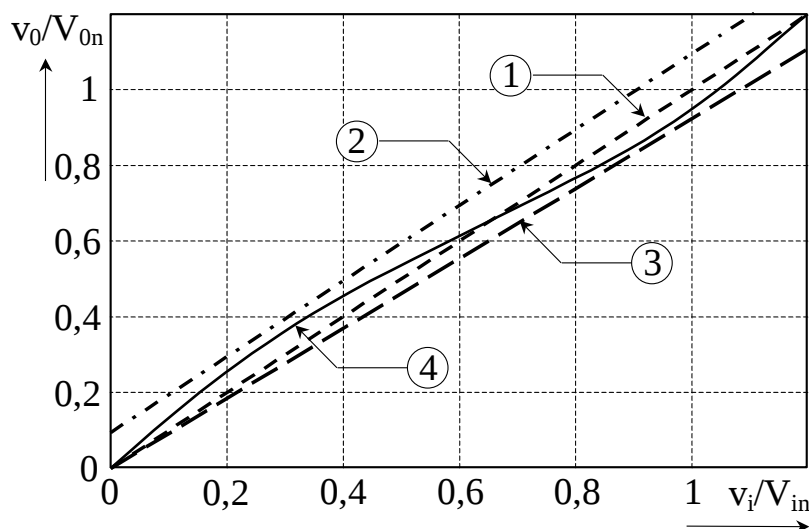
**Tabel 1/2. Date experimentale amplificator diferențial/instrumental**

| $v_i$    | $v_0^*$    | $v_0$    | $v_0^{\circ}$    | $\Delta v_0$    | $\varepsilon_n$ |
|----------|------------|----------|------------------|-----------------|-----------------|
| 0        | $V_{d0}$   | —        | —                | —               |                 |
| $v_{i1}$ | $v_{01}^*$ | $v_{01}$ | $v_{01}^{\circ}$ | $\Delta v_{01}$ |                 |
| :        | :          | :        | :                | :               |                 |
| $v_{i4}$ | $v_{04}^*$ | $v_{04}$ | $v_{04}^{\circ}$ | $\Delta v_{04}$ |                 |

**4.1.4. Se compară datele pentru cele două variante ale amplificatorului și se precizează cauzele posibile care determină diferențele dintre acestea.**

**Observații:**

1. În graficul din Fig.3 sunt trasate formele tipice ale caracteristicii de transfer a unui amplificator de măsurare. Acestea au următoarea semnificație:
  - **curba 1** – reprezintă caracteristica de transfer ideală (în sensul de liniară), rezultată prin calcul cu (14);



**Fig.3. Formele caracteristicii de transfer a unui amplificator de măsurare.**

- **curba 2** – reprezintă caracteristica de transfer obținută prin neglijarea erorii de neliniaritate și luarea în considerare a tensiunii de decalaj la intrare;
- **curba 3** – reprezintă caracteristica de transfer obținută prin neglijarea erorii de neliniaritate și considerarea abaterii factorului de amplificare real față de cel calculat, care are ca efect modificarea pantei caracteristicii de transfer, fapt ceea ce conduce la o eroare de proporționalitate dată de relația:

$$\varepsilon_p = \frac{A - A_0}{A_0} \cdot 100[\%] \quad (17)$$

- **curba 4** – reprezintă una din formele posibile ale caracteristicii reale de transfer (cu neliniaritate), care poate să rezulte din (12);
2. În mod normal, caracteristica de transfer a unui amplificator de măsurare este afectată simultan de toate cele trei tipuri de erori: eroarea de zero, eroarea de proporționalitate și eroarea de neliniaritate, iar caracteristica reală de transfer rezultă ca combinație a curbelor 2, 3 și 4.

## 5. ÎNTREBĂRI

- 5.1. Ce diferență de potențial este între intrările unui amplificator operațional ideal.
- 5.2. Care sunt diferențele principale dintre cele două variante ale amplificatorului de măsurare?
- 5.3. Cum este avantajos, și din ce cauză, să fie repartizată amplificarea globală a unui amplificator instrumental pe cele două etaje componente ( $U_1 + U_2$  și  $U_3$ )?
- 5.4. Care sunt sursele principale de generare a erorilor de zero, de proporționalitate și de neliniaritate?
- 5.5. Care este expresia tensiunii totale de decalaj la ieșire, pentru fiecare din cele două variante ale amplificatorului de măsurare?