





Universitatea  
Transilvania  
din Braşov

Aurel Cornel STANCA

Florin SANDU

# **CIRCUITE ELECTRONICE FUNDAMENTALE**

Aplicații

BRAȘOV, 2023

# PREFAȚĂ

Data fiind orientarea "PBL" (Problem-Based Learning) a disciplinei "CEF" - Circuite Electronice Fundamentale, prezenta lucrare, "CEF-Aplicații" e puternic orientată "pe metodă și nu pe structuri". Scopul eformativ și nu neapărat informativ – se preferă mai multe metode pentru a rezolva un circuit decât rezolvarea mai multor circuite cu o metodă.

Accentul pronunțat pe formarea unor deprinderi de abordare cu grafuri, scriere a ecuațiilor circuitelor, calcule analitice (de performanță) și de sinteză (de proiectare) face ca varietatea funcțională și structurală să nu fie o prioritate, categoriile de circuite electronice fundamentale abordate fiind: amplificatoare cu reacție negativă, oscilatoare armonice și, dintre circuitele de alimentare, redresoare și stabilizatoare de tensiune, ponderea principală fiind acordată acestora din urmă. Generic, primele două capitole tratează reacția negativă și reacția pozitivă ( - "la perturbații", în sensul atenuării și respectiv ambalării efectelor acestora *și în celelalte cazuri*).

Esența ingineriei e rezolvarea de probleme practice de analiză și proiectare. De obicei avem pornirea de a scrie... prea multe ecuații, cu prea multe notații. Lucrarea de față propune abordări preliminare "ne-structurate" (tocmai pentru a ne ajuta să înțelegem topologia, întrucât un anumit etaj – de exemplu un amplificator cu reacție – poate fi precedat/succedat de alte etaje, de intrare/ieșire). Văzând care semnale (de exemplu potențiale alternative sau curenți) par să se repete "dinspre intrare/ieșire către interiorul circuitului, prezența unor eventuale "mase virtuale" (puncte de potențial alternativ aproximativ zero) și/sau a unor curenți neglijabili (în baza sau grila tranzistoarelor, la intrarea amplificatoarelor operaționale etc), această abordare preliminară permite "decelarea" sub-circuitelor funcționale, "scoaterea lor din context" (spre a fi echivalate) și readucerea lor în schema globală pentru calculele finale, așadar o "abordare structurată" pentru ultimele calcule de detaliu. Totodată, această abordare preliminară poate indica "fluența" semnalelor și poate permite o abordare nestructurată cu "grafuri" – a "desenului" asociat și nu direct a ecuațiilor.

Rezolvările de probleme prezentate în această lucrare sunt în mare parte complete, cu calcule literale și numerice aproximative și, apoi, exacte, discuții și verificări dimensionale (formula unităților de măsură dublează relațiile de calcul – se poate vedea astfel imediat dacă vreun termen a fost omis sau inversat etc). Comparațiile metodologice sunt însoțite de verificări de consistență. Pentru acoperirea unei diversități de scheme și structuri, unele rezolvări sunt "schițate" (chiar și pentru a ghida primii pași în rezolvarea unor probleme propuse).

Cu speranța că această lucrare poate fi utilă nu numai studenților de la ETTI (Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale), ci și celor de la alte programe de studii sau oricărui absolvent interesat, dorim să încurajăm viitorii ingineri la abordarea foarte serioasă a problemelor, a calculelor - evident cu alte obiective decât simpla simulare asistată de calculator, disponibilă azi și pe telefoanele inteligente.

A.C.Stanca și F.Sandu

Brașov, 2023

## Cuprins

|   |     |
|---|-----|
| 1. AMPLIFICATOARE CU REACȚIE NEGATIVĂ (RN)..... | 5   |
| 2. OSCILATOARE ARMONICE .....                   | 54  |
| 3. STABILIZATOARE DE TENSIUNE.....              | 90  |
| 4. EXEMPLE DE TESTE PROPUSE .....               | 120 |
| 5. BIBLIOGRAFIE.....                            | 126 |

# 1. AMPLIFICATOARE CU REACȚIE NEGATIVĂ (RN)

## 1.1 Introducere

Prima abordare recomandată e **aproximarea de c.a.** Avantajul acestei metode directe este caracterul ei "nestructurat" – faptul că nu necesită identificarea funcțiilor de sub-circuite. Ea permite observarea mărimilor care se repetă:

- de la intrare către interiorul circuitului (regăsindu-se la ieșirea sub-circuitului de reacție) – în zona acestei repetări se poate observa, orientativ și o masă virtuală sau un curent neglijabil (de bază, de grilă sau de la intrarea AO), deci **o impedanță ideală de intrare în etajul cu RN** propriuzis; aici e prima delimitare (separare) pentru
  - "extragerea din context" a etajului cu RN, care
    - se va calcula separat cu metodele TRN (Teoria RN) și, în final,
    - se va readuce - prin echivalentele sale ( $Z_{i, b.i.}$ ,  $A_{b.i.}$ ,  $Z_{o, b.i.}$ ) în schema globală, în care
    - se fac calculele finale;
- dinspre ieșire către interiorul circuitului (regăsindu-se la intrarea sub-circuitului de reacție, în "eșantionator").

Așadar, **identificarea topologiei** de RN printr-o primă aproximare, permite apoi alegerea metodei adecvate pentru următoarea aproximare (a TRN) și echivalarea etajului extras din context, urmată de readucerea acestuia în schema globală.

## 1.2. Probleme rezolvate

1.2.1. Fie amplificatorul din Fig.1.2.1.1 unde  $\beta_{1+4}=100$  și  $U_{BE}=0,6V$ . Să se determine:

- Punctele statice de funcționare (PSF) ale tranzistoarelor  $T_{1+3}$ ;
- Amplificarea  $S_i = \frac{J_C}{J_I}$  în curent alternativ, prin calcul aproximativ (NNN);
- Amplificarea  $S_i = \frac{J_C}{J_I}$  în curent alternativ, prin metoda teoriei reacției negative (TRN).<sup>1</sup>

Figura 1.2.1.1

### Rezolvare:

a) Se neglijează curentul de bază al tranzistorului  $T_4$ , ( $I_{B4} \cong 0$ )  $\Rightarrow$

$R_2$  și  $R_3$  formează un divizor rezistiv de tensiune. Se poate astfel determina căderea de tensiune pe  $R_3$ :

$$I_{F3} = \frac{F_3}{F_2 + F_3} I_{J77} \approx \frac{5}{25 + 5} \cdot 12 = 6 \text{ mA}$$

Se determină curentul prin tranzistorul  $T_4$  în PSF:

$$\bar{I}_{B4} = \bar{I}_{C4} = \bar{I}_{E4} = \bar{I}_{F6} = \frac{I_{F3} \cdot I_{E4}}{F_6} = \frac{3 \cdot 0,6}{1} = 2,4 \text{ mA}$$

Verificarea premisei că  $I_{B4}$  este neglijabil:

$$\text{Calculăm curenții } \bar{I}_{B4} = \frac{\bar{I}_{C4}}{\beta} = \frac{2,4}{100} = 24 \mu\text{A} \text{ și } \bar{I}_{B3} = \frac{I_{J77} \cdot I_{E3}}{F_2 + F_3} = \frac{18}{30} = 600 \mu\text{A}$$

Se observă că  $\bar{I}_{B4} \ll \bar{I}_{B3} \Rightarrow$  premisa este confirmată.

<sup>1</sup>După problema 11.30 din "Dispozitive și circuite electronice. Probleme" de Dascălu D., ș.a., Ed. Did. și Ped., București, 1982

Presupunem că  $I_{B2}$  și  $I_{B3}$  sunt neglijabili în comparație cu curenții  $I_{R5}$ ,  $I_{C2}$  respectiv  $I_{E3}$ ,  $I_{R7}$ ,  $I_8$ , deci  $I_{B2} = I_{B3} \cong 0$ ,  $I_{E2} \cong I_{C2}$ ,  $I_{E3} \cong I_{C3}$ ,  $I_{B1} > 0$  asigurând astfel polarizarea bazei lui  $T_1$ . Pentru determinarea curenților de interes,  $I_{C1+3}$ , găsim 3 relații în care sunt implicați acești curenți:

$$\bar{I}_{C1} = \bar{I}_{C3} = 1 - \bar{I}_{C2} \Rightarrow \bar{I}_{C1} = \bar{I}_{C3} = 1 - \bar{I}_{C2} \quad (1.2.1.1)$$

$$\bar{I}_{C1} = \bar{I}_{C3} = 1 - \bar{I}_{C2} \Rightarrow \bar{I}_{C1} = \bar{I}_{C3} = 1 - \bar{I}_{C2} \quad (1.2.1.2)$$

$$\bar{I}_{C1} = \bar{I}_{C3} = 1 - \bar{I}_{C2}$$

$$\bar{I}_{C1} = \bar{I}_{C3} = 1 - \bar{I}_{C2} \Rightarrow \bar{I}_{C1} = \bar{I}_{C3} = 1 - \bar{I}_{C2} \quad (1.2.1.3)$$

$$\bar{I}_{C1} = \bar{I}_{C3} = 1 - \bar{I}_{C2}$$

$$\bar{I}_{C1} = \bar{I}_{C3} = 1 - \bar{I}_{C2} \Rightarrow \bar{I}_{C1} = \bar{I}_{C3} = 1 - \bar{I}_{C2}$$

Se verifică premisa de neglijare a curenților  $\bar{I}_{B2}$  și  $\bar{I}_{B3}$ .

$\bar{I}_{B2} = \frac{\bar{I}_{C2}}{\beta} = 13.5 \mu A \ll 0.54 \text{ mA} = \bar{I}_{C2} \cong \bar{I}_{B3} \cong \bar{I}_{C3}$  și respectiv  $\bar{I}_{B3} = \frac{\bar{I}_{C3}}{\beta} = 5.4 \mu A \ll 1.36 \text{ mA} = \bar{I}_{C3} \cong \bar{I}_{B2} \Rightarrow$  premisa se verifică.

Calculul căderilor de tensiune pe tranzistoare în PSF:

$$I_{R9} = J_{R7} - I_{F7} + I_{F8} \Rightarrow \bar{I}_{R9} = 12 \text{ mA} - 6 \text{ mA} \cdot 0.54 = 8.76 \text{ mA}$$

$$J_{C2} = \bar{I}_{B3} \cdot F_8 = 0.54 \text{ mA} \cdot 1 \text{ mA} = 0.54 \text{ mA} \Rightarrow$$

$$J_{R1} = J_{R2} = J_{R4} = J_{C2} - I_{C2} = 0.54 \text{ mA} - 0.54 \text{ mA} = 0 \text{ mA}$$

$$J_{R1} = J_{R7} - F_4 \cdot \bar{I}_{R1} = 12 \text{ mA} - 6 \text{ mA} \cdot 1.04 = 5.76 \text{ mA}$$

$$J_{R2} = J_{R7} - F_5 \cdot \bar{I}_{R2} = 12 \text{ mA} - 6 \text{ mA} \cdot 1.36 = 3.84 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_{R1} = J_{R1} - J_{R1} = 5.76 \text{ mA} + 0.06 \text{ mA} = 5.82 \text{ mA} \text{ și } I_{R2} = J_{R2} - J_{R2} = 3.84 \text{ mA} + 0.06 \text{ mA} = 3.9 \text{ mA}$$

Aşadar vom avea:

$$PSF_1 \begin{cases} \bar{r}_1 = 1\% (a 5) \\ I_{H1} = 1 \text{ } \& J 2 \$ * J 1 I_{69\%} \Rightarrow F 5 B \end{cases}$$

$$PSF_2 \begin{cases} \bar{r}_2 = 1\% * a 5 \\ I_{H2} = 1 \text{ } \& J 2 \$ * J 1 I_{69\%} \Rightarrow F 5 B \end{cases}$$

$$PSF_3 \begin{cases} \bar{r}_3 = 1\% (a 5) \\ I_{H3} = 1 \text{ } * \& J 2 \$ * J 1 I_{69\%} \Rightarrow F 5 B \end{cases}$$

$$f_{V1} = \frac{! \cdot U}{40 \cdot \bar{r}_1} = \frac{25J}{104a 5} \approx 24 \text{ "}$$

$$f_{V2} = \frac{! \cdot U}{40 \cdot \bar{r}_2} = \frac{25J}{136a 5} \approx 184 \text{ "}$$

$$f_{V3} = \frac{! \cdot U}{40 \cdot \bar{r}_3} = \frac{25J}{084a 5} \approx 483 \text{ "}$$

b) Deoarece  $U_{be1} = U_{be2} \approx 0 \Rightarrow V_i \approx V_{e1} = V_{e2} \approx V_{b2}$ , Fig.1.2.1.2. Cum  $I_{b2} \approx 0 \Rightarrow R_7$  și  $R_8$  formează un divizor rezistiv de tensiune.

Se poate deci stabili următoarea relație între  $V_i$  și  $V_o$ :

$$J_j = \frac{F_8}{F_7 + F_8} J_c = \frac{1}{5 + 1} J_c \Rightarrow 5_i = \frac{J_c}{J_j} = 6$$

**Observație:**  $I_{V1} \approx 0$   $J_{Uf} V_{dYH} Y' U_{b2} U_{a} V_i$   $i$   $J_{gYf} J_Y F' J F$   $g_i$   $bh' U' a$   $U_{gP} \Rightarrow J_{V1} 1 \$ J'' 8 Yc U F Y W' I_{V1} \approx 0 V$   
 $\Rightarrow J_{V1} \approx \$ J$   $f_{b} U_{gP} j$   $J_{fH} U_{P L}'' 5 a$   $V Y Y' V_{dYH} U Y' i$   $J F$   $g_i$   $bh' U' a$   $U_{gP} \& X Y W' \bar{r}_1 \approx \bar{r}_1 1 \$'' 7 i$   $f y b h i$   $'' d f j b$   $H_i$   $f b$   
 $f Y [ j a$   $X j b U a$   $J M Y g h Y' b i$   $'' X Y W' U_{b2} U_{a} V_i$   $'' F_{\&} Z F$   $z H_i z F$   $g Y' V e a$   $d c f f b$   $V U' c$   $g_i$   $f g b$   $X Y' W' f y b h' V e b g h U b h' W f Y' b i$   
 $g Y' j$   $Y X Y$   $f b$   $V U''$

$5 W U$   $J' i$   $V i$   $g Y' d c U H Y' U Z j f a$   $U' j c$   $V g Y f j$   $Y b X' Z U d h i$   $'' V b$   $g Y a$   $b U i$   $'' U h y f b U h j i$   $g Y' U d$   $J M P' X c U f$   $f b$   $V e$   $Y V e c f i$   $'' i$   $J H_i z$   
 $I_{V1}$   $f g Y a$   $b U i$   $'' X Y' j b h f U F Y E Z j j b X' \$ J$   $f g j$   $f g b$   $j b X Y d Y b X Y b h b$   $X Y' h y b g j i$   $b Y'' U' j b h f U F Y z d U g j j$   $J n U P L'' H f U b n j g h c f i$   $'' j$   $U$   
 $d f Y n Y b h U' f b$   $U M Y g h' V U h' c' j a$   $d Y X U b$   $P' Y [ U P' W' j a$   $d Y X U b$   $U' X Y' j Y$   $J f Y$   $f b$   $'' a$   $c b h U' g U F V j b b$   $X j g h f j V i$   $J H z$   $U X j M P'$   
 $\Rightarrow W f y b h U h y f b U h j i$   $b i$   $''$



*Figura 1.2.1.2*

c) Nucleul reacției negative din amplificator este cel prezentat în Fig.1.2.1.3. Este evidențiată topologia amplificatorului (etajului de amplificare) cu reacție negativă: eșantionare de potențial (tensiune) în nod și comparare de potențiale (tensiuni) în buclă (reacție de tensiune - serie sau reacție paralel – serie). Sunt puși în evidență diporții  $D'$  – pe calea directă și  $D''$  – pe calea inversă.

*Figura 1.2.1.3*

Conform TRN, se deschide bucla de reacție și se încarcă intrarea și ieșirea diportului  $D'$  cu câte o replică a diportului  $D''$ , respectiv  $D''_{in}$  și  $D''_{out}$  ca în Fig.1.2.1.4. Impedanța de ieșire a diportului  $D''_{in}$  este 0, ideală în tensiune (mărimea de la ieșirea nucleului de reacție negativă), deci se scurtcircuitază (se pune la masă), iar impedanța de intrare a diportului  $D''_{out}$  este  $\infty$ , ideală în tensiune (mărimea de la intrarea nucleului de reacție negativă), deci se lasă în gol.

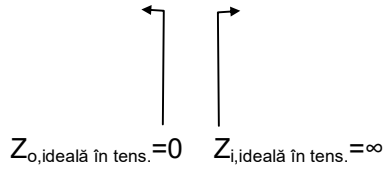


Figura 1.2.1.4

În aceste condiții se poate trece la determinarea amplificării în tensiune în buclă deschisă  $A_{u,bd}$  și a impedanțelor de intrare  $R_{i,bd}$  și de ieșire  $R_{o,bd}$  (necesare la calculul impedanțelor de intrare respectiv ieșire buclă închisă a nucleului de reacție negativă). Se va ține cont de faptul că  $R_{7i}=R_{7o}=R_{7i}$ ,  $R_{8i}=R_{8o}=R_{8i}$  și  $\beta_1=\beta_2=\beta$ .

$$J_c = \beta F_7 + F_8 \cdot \beta \left( \beta + 1 \right) \left( \frac{F_5}{F_5 + F_{JHB}} \right) \left( \frac{\beta}{\beta + 1} \right) \left( \frac{1}{F_{JH2}} \right) \beta J_{Y2} \cdot \beta$$

$$F_{JHB} = F_{JHB-77} = f_{V3} + \beta + 1 \cdot \beta F_7 + F_8 \cdot \beta = 4,83 \cdot 10^{-6} + 101 \cdot 6 \cdot 10^{-6} = 610,83 \cdot 10^{-6}$$

$$F_{JH2} = F_{JH2-67} = \frac{f_{V2} + F_7 \cdot \beta F_8}{\beta + 1} = \frac{1,84 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} \cdot \beta}{101} = 0,026 \cdot 10^{-6}$$

$$\Rightarrow S_{i, \beta X} = \frac{J_c}{J_{Y2}} = \frac{\beta \cdot F_5 \cdot \beta F_7 + F_8 \cdot \beta}{\beta F_5 + F_{JHB} \cdot \beta F_{JH2}} = \frac{100 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot \beta + 1 \cdot 10^{-6} \cdot \beta}{\beta \cdot 10^{-6} + 610,83 \cdot 10^{-6} \cdot \beta \cdot 0,026 \cdot 10^{-6}} = 94,16$$

iar  $F_{JHX} = F_{JH2} = 0,026 \cdot 10^{-6}$  și

$$F_{cHX} = F_{cHB} \cdot \beta F_7 + F_8 \cdot \beta = \frac{f_{V3} + F_5}{\beta + 1} \cdot \beta F_7 + F_8 \cdot \beta = \frac{4,83 \cdot 10^{-6} + 6 \cdot 10^{-6}}{101} \cdot \beta + 1 \cdot 10^{-6} \cdot \beta = 0,103 \cdot 10^{-6}$$

Calculul lui  $\beta_{RN}$  se va face pe replica de ieșire a cuadripolului D", deci pe D"\_{out}, privit de data aceasta cu intrarea dinspre ieșirea amplificatorului și cu ieșirea spre intrarea amplificatorului (ca în schema cu buclă închisă), Fig.1.2.1.5  $\beta_{\&}$  are un astfel de sens încât se scade din  $\beta_{\&} = \beta_{\&}$ .

$$\beta_{FB} = \frac{I_c}{I_j} = \frac{F_8}{F_7 + F_8} = \frac{1}{5 + 1} = \frac{1}{6}$$