

## PARAMETRII DIPORȚILOR

### 1) Obiectul lucrării de laborator

În lucrare sunt studiate metodele de măsurare experimentală a parametrilor asociați unor formalisme de descriere a diporților precum și relațiile dintre acești parametri. Este analizat modul de lucru pe impedanțe imagine.

### 2) Aspecte teoretice

#### a) Diport electric. Formalisme asociate

Un diport este constituit dintr-o rețea electrică accesibilă la patru borne (terminale) astfel încât bornele sunt grupate în două perechi (1 – 1') și (2 – 2'), iar curentul care intră într-o bornă a unei perechi (1 sau 2) este egal cu curentul care iese din cealaltă bornă din pereche (1' sau 2').

Diportul este caracterizat prin:

- Cei doi cureni  $I_1$  și  $I_2$ ;
- Cele două tensiuni de la porți  $U_1$  și  $U_2$ .

Prin majuscule notăm amplitudini complexe funcție de  $\omega$  sau  $s$ . A se vedea figura 1.



Figura 1

Cele patru mărimi  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $I_1$  și  $I_2$  pot fi determinate unic din patru relații neomogene liniar independente. Întrucât la cele două porți se pot scrie două condiții la limită (terminale), rezultă că mai sunt necesare două relații (omogene sau nu) între cele patru mărimi. Aceste două relații, care depind numai de structura internă a diportului, constituie ceea ce se numește un formalism de descriere a diportului. Dacă diportul este liniar atunci un formalism realizează o aplicație liniară de la două din cele patru mărimi ( $U_1$ ,  $U_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ) la celelalte două mărimi. Întrucât ordinea într-o pereche nu este esențială, rezultă că pentru un diport există:

$$n = C_4^2 = \frac{4 \cdot 3}{1 \cdot 2} = 6 \text{ formalisme}$$

Notând cu  $X_1$ ,  $X_2$  primele două elemente ale unui formalism, iar cu  $X_3$ ,  $X_4$  celelalte două rezultă din definiția dată:

$$M: (X_1, X_2) \rightarrow (X_3, X_4)$$

$$\begin{bmatrix} X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

în care  $M_{ij}$  sunt numere, în general, complexe.

Cele șase formalisme sunt:

- formalismul  $Z$  sau de impedanță;
- formalismul  $Y$  sau de admitanță;
- formalismul  $A$  sau lanț sau de transmisie;
- formalismul  $B$  sau lanț invers sau de transmisie inversă;
- formalismul  $h$  sau hibrid;
- formalismul  $g$  sau hibrid invers.

Structurile celor șase formalisme sunt prezentate în tabelul 1. Prin  $\Delta_M$  a fost notat determinantul matricei care caracterizează formalismul considerat.

Tabelul 1. Diferite formalisme de descriere a diporților

<u>Formalismul <math>Z</math>-impedanță</u> $\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = [Z] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$	<u>Formalismul <math>Y</math>-admitanță</u> $\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [Y] \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$
<u>Formalismul <math>A</math>-lanț</u> $\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{bmatrix}$	<u>Formalismul <math>B</math>-lanț invers</u> $\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ -I_1 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = [B] \begin{bmatrix} U_1 \\ -I_1 \end{bmatrix}$
<u>Formalismul <math>h</math>-hibrid</u> $\begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [h] \begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$	<u>Formalismul <math>g</math>-hibrid invers</u> $\begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = [g] \begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$

Se observă că au loc relațiile de inversiune:

$$[Z]^{-1} = [Y], \quad [h]^{-1} = [g]$$

Parametrii  $M_{ij}$  asociați unui anumit formalism au semnificații fizice care conduc la metode de măsurare. Spre exemplu din:  $X_3 = M_{11}X_1 + M_{12}X_2$  rezultă:

$$M_{11} = \left. \frac{X_3}{X_1} \right|_{X_2=0} \quad M_{12} = \left. \frac{X_3}{X_2} \right|_{X_1=0} \quad (2)$$

Ținând seama că mărimile  $X_i$  sunt tensiuni sau curenți, rezultă că parametrii  $M_{ij}$  sunt imitanțe sau funcții de transfer evaluate în gol sau în scurt.

Relațiile de trecere de la un grup de parametri la altul sunt cuprinse în tabelul 2.

Reciprocitatea este o proprietate importantă a rețelelor RLC și se manifestă prin existența unei legături între parametrii  $M_{ij}$ . În tabelul 2, în coloana "Reciprocitate" se pot observa legăturile impuse de reciprocitate în diferite formalisme.

Simetria unui diport introduce o nouă relație între parametrii unui diport. În tabelul 2, în ultima coloană sunt cuprinse legăturile impuse de simetrie în diferite formalisme.

Tabelul 2. Relațiile dintre parametri asociați diferitelor formalisme  $\Delta X = \det[X]$

	<b>Z</b>	<b>Y</b>	<b>h</b>	<b>A</b>	Reciprocitate	Simetrie
<b>Z</b>	$[Z]$	$\begin{bmatrix} \frac{Y_{22}}{\Delta Y} & -\frac{Y_{12}}{\Delta Y} \\ -\frac{Y_{21}}{\Delta Y} & \frac{Y_{11}}{\Delta Y} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{\Delta h}{H_{22}} & \frac{h_{12}}{H_{22}} \\ \frac{h_{21}}{h_{22}} & \frac{1}{h_{22}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{A_{11}}{A_{21}} & \frac{\Delta A}{A_{21}} \\ 1 & \frac{A_{22}}{A_{21}} \end{bmatrix}$	$Z_{12} = Z_{21}$	$Z_{11} = Z_{22}$
<b>Y</b>	$\begin{bmatrix} \frac{Z_{22}}{\Delta Z} & -\frac{Z_{12}}{\Delta Z} \\ -\frac{Z_{21}}{\Delta Z} & \frac{Z_{11}}{\Delta Z} \end{bmatrix}$	$[Y]$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{h_{11}} & -\frac{h_{12}}{h_{11}} \\ \frac{h_{21}}{h_{11}} & \frac{\Delta h}{h_{11}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{A_{22}}{A_{12}} & -\frac{\Delta A}{A_{12}} \\ 1 & \frac{A_{11}}{A_{12}} \end{bmatrix}$	$Y_{12} = Y_{21}$	$Y_{11} = Y_{22}$
<b>H</b>	$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Z}{Z_{22}} & \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \\ -\frac{Z_{21}}{Z_{22}} & \frac{1}{Z_{22}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{Y_{11}} & -\frac{Y_{12}}{Y_{11}} \\ \frac{Y_{21}}{Y_{11}} & \frac{\Delta Y}{Y_{11}} \end{bmatrix}$	$[h]$	$\begin{bmatrix} \frac{A_{12}}{A_{22}} & \frac{\Delta A}{A_{22}} \\ 1 & C \end{bmatrix}$	$h_{12} = -h_{21}$	$\Delta h = 1$
<b>A</b>	$\begin{bmatrix} \frac{Z_{11}}{Z_{21}} & \frac{\Delta Z}{Z_{21}} \\ 1 & \frac{Z_{22}}{Z_{21}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{Y_{22}}{Y_{21}} & \frac{1}{Y_{21}} \\ -\frac{\Delta Y}{Y_{21}} & -\frac{Y_{11}}{Y_{21}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{\Delta h}{h_{21}} & -\frac{h_{11}}{h_{21}} \\ \frac{h_{22}}{h_{21}} & \frac{1}{h_{21}} \end{bmatrix}$	$[A]$	$\Delta A = 1$	$A_{11} = A_{22}$

$[Z], [Y], [h], [A]$  sunt descrise în tabelul 1.

**Impedanțele imagine.** Pentru un uniport (2-terminale) este binecunoscut conceptul de adaptare. Pentru un diport acest concept este generalizat prin introducerea unei perechi de impedanțe care realizează adaptarea la ambele porți. Se numesc impedanțe imagine –  $Z_{01}$  și  $Z_{02}$  – acele două impedanțe care îndeplinesc următoarele condiții: conectând la poarta 2 (respectiv 1) impedanța de sarcină  $Z_{02}$  (respectiv  $Z_{01}$ ), impedanța de intrare la poarta 1 (respectiv 2) este egală cu  $Z_{01}$  (respectiv  $Z_{02}$ ). Definiția este ilustrată în figura 2.

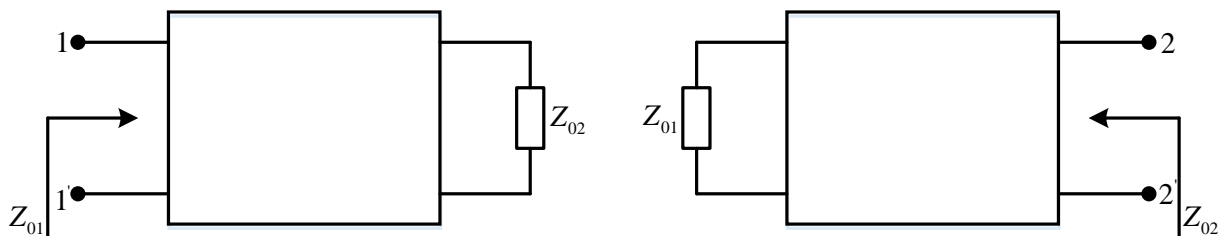


Figura 2

Rezultă că un diport alimentat la poarta 1 cu un generator de impedanță internă  $Z_{01}$  și încărcat la poarta 2 pe impedanța  $Z_{02}$  realizează o structură electrică cu proprietatea că impedanțele văzute, la stânga și la dreapta în secțiunile 11' și 22' sunt egale ( $Z_{01}$  și respectiv  $Z_{02}$ ). Situația este arătată în figura 3. Se spune că diportul lucrează adaptat pe impedanțele imagine sau pe scurt adaptat pe imagini.

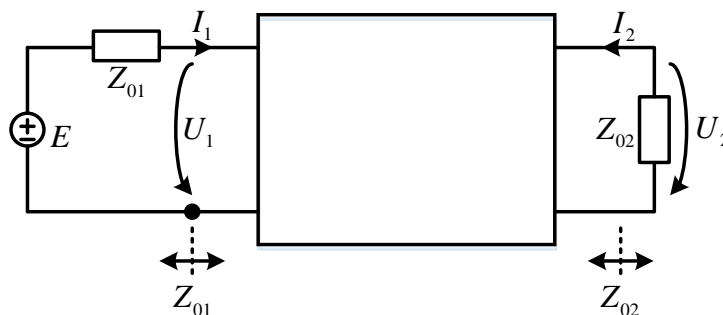


Figura 3

Se folosesc următoarele notații:

- $Z_{kg}$  = impedanța de intrare la poarta  $k$  (1 sau 2) când cealaltă poartă (2 sau 1) este în gol;
- $Z_{ksc}$  = impedanța de intrare la poarta  $k$  (1 sau 2) când cealaltă poartă (2 sau 1) este în scurt.

Se arată că cele două impedanțe imagine  $Z_{01}$  și  $Z_{02}$  se pot calcula cu formulele:

$$\begin{aligned} Z_{01} &= \sqrt{Z_{1g} \cdot Z_{1sc}} & Z_{02} &= \sqrt{Z_{2g} \cdot Z_{2sc}} \\ Z_{01} &= \sqrt{\frac{A_{11}A_{12}}{A_{21}A_{22}}}, & Z_{02} &= \sqrt{\frac{A_{12}A_{22}}{A_{11}A_{21}}} \end{aligned} \quad (3)$$

Se observă că dacă diportul conține elemente de circuit RLC (parametri concentrați) atunci  $Z_{01}$  și  $Z_{02}$  nu mai sunt realizabile cu același tip de elemente. Dacă însă diportul cuprinde numai rezistențe, atunci  $Z_{01}$  și  $Z_{02}$  sunt tot rezistențe.

Dacă diportul este simetric atunci

$$Z_{01} = Z_{02} = Z_0 \quad (4)$$

iar valoarea comună se numește impedanța caracteristică a diportului.

### b) Comportarea unui diport și a unui lanț de diporți adaptat pe imagini

Adaptarea pe imagini permite o exprimare sugestivă și condensată a performanțelor unui diport.

Fie un diport adaptat pe imagini, conform figurii 3. Puterea aparentă complexă care este absorbită de diport este dată de  $S_1 = U_1 I_1$ , iar puterea aparentă complexă furnizată în sarcină  $S_2 = U_2 I_2$ . Scriind

$$S_1 = S_2 e^{2g}, \quad (5)$$

mărimea  $g$ , denumită exponentul de transfer pe imagini (mărime, în general, complexă) reprezintă o măsură combinată a atenuării și defazării introduse în diport:

$$g = a + jb, \quad (6)$$

în care  $a$  este constanta de atenuare, măsurată în neperi, iar  $b$  constanta de defazare, măsurată în radiani. Mai putem scrie:

$$g = \frac{1}{2} \ln \frac{U_1 I_1}{-U_2 I_2} \quad (7)$$

Pentru condițiile terminale putem scrie:

$$U_1 = Z_{01} I_1 \quad U_2 = Z_{02} I_2.$$

Din care obținem două relații de calcul utile:

$$g = \ln \left( \frac{U_1}{U_2} \sqrt{\frac{Z_{02}}{Z_{01}}} \right) = \ln \left( \frac{I_1}{-I_2} \sqrt{\frac{Z_{01}}{Z_{02}}} \right) \quad (8)$$

care permite determinarea constantei  $g$  folosind numai măsurători de tensiune.

Folosind expresiile impedanțelor imagine, constanta  $g$  se poate exprima în funcție de parametrii **A** prin:

$$g = \ln(\sqrt{A_{11}A_{22}} + \sqrt{A_{12}A_{21}}) \quad (9)$$

Dacă diportul este reciproc mai rezultă:

$$\begin{aligned} ch(g) &= \sqrt{A_{11}A_{22}}, & sh(g) &= \sqrt{A_{12}A_{21}} \\ th(g) &= \sqrt{\frac{Z_{1sc}}{Z_{1g}}} = \sqrt{\frac{Z_{2sc}}{Z_{2g}}} \end{aligned} \quad (10)$$

unde  $ch$  – cosinus hiperbolic,  $sh$  – sinus hiperbolic, iar  $th$  – tangent hiperbolic.

Se spune că ansamblul de diporți este conectat în cascadă sau în lanț dacă ieșirea unui diport reprezintă intrarea diportului următor, așa cum se arată în figura 4.

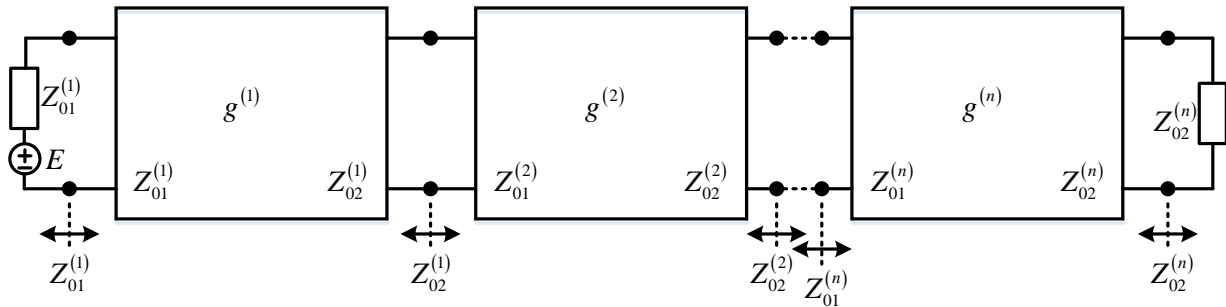


Figura 4

Se spune că un ansamblu de diporți conectați în cascadă, pe scurt lanț de diporți, lucrează pe bază de parametri imagine, dacă la orice punct de interconectare între diporți, la interconectarea generatorului la primul diport și la interconectarea ultimului diport la impedanța sarcină, impedanțele văzute la stânga și la dreapta sunt egale.

Notând cu  $Z_{01}^{(k)}$ ,  $Z_{02}^{(k)}$  impedanțele imagine ale diportului de rang  $k$ , condiția de lucru pe bază de imagini se scrie:

$$\begin{cases} Z_g = Z_{01}^{(1)} \\ Z_s = Z_{02}^{(n)} \end{cases} \quad (11)$$

$$Z_{02}^{(k)} = Z_{01}^{(k+1)}, \quad k = 1, 2, \dots, n-1.$$

Se arată (și acest fapt are o importanță aplicativă decisivă) că lanțul de diporți este echivalent cu un diport având:

$$Z_{01} = Z_{01}^{(e)} = Z_{01}^{(1)}, \quad Z_{02} = Z_{02}^{(e)} = Z_{02}^{(n)}$$

și

$$g = g^{(e)} = \sum_{k=1}^n g^{(k)} \quad (12)$$

în care  $g^{(k)}$  este exponentul de transfer pe imagini al diportului de rang  $k$ , iar  $^{(e)}$  înseamnă echivalent.

Privitor la faptul că impedanțele imagine se confundă cu impedanța caracteristică și că pentru un diport simetric cu atenuare mare (15-20 dB, a se vedea definițiile corespunzătoare) impedanța de intrare este practic egală cu impedanța caracteristică oricare ar fi impedanța terminală, are loc următorul rezultat: dacă atenuarea introdusă de diport în ambele sensuri este mare atunci impedanța de intrare la poarta  $k$ ,  $k = 1, 2$ , este practic egală cu  $Z_{0k}$ , oricare ar fi impedanța terminală la acea poartă.

Atragem atenția asupra următorului fapt important. Transmisia de la poarta 1 la poarta 2 este caracterizată prin constanta  $g$  dată de relația (9). Pentru transmisia inversă, de la poarta 2 la poarta 1 folosim formalismul  $\mathbf{B}$  (tabelul 1).

Se poate arăta că:

$$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta A} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

din care rezultă expresia exponentului de transfer invers:

$$g' = \ln(\sqrt{A_{11}A_{22}} + \sqrt{A_{12}A_{21}}) - \ln\sqrt{\Delta A}. \quad (13)$$

adică, în general,  $g' \neq g$ , cu alte cuvinte pentru un diport nereciproc  $\Delta A \neq 1$  transferul de putere este diferit în funcție de sensul ales. Dacă este reciproc, are loc

$$\Delta A = 1, \quad g' = g,$$

adică transferul de putere este același în ambele sensuri.

### c) Efectul produs de inserarea unui diport

În unele aplicații este important să se evalueze efectul introducerii diportului între un generator, având în reprezentarea Thévenin elementele  $g$  și  $Z_g$  și sarcina  $Z_s$  pe care debitează. Efectul este evaluat față de o situație de referință. În funcție de situația de referință aleasă se disting două cazuri importante.

În primul caz, situația de referință este cea în care generatorul lucrează pe o impedanță egală cu impedanța internă  $Z_g$ . Situația este arătată în figura 5.

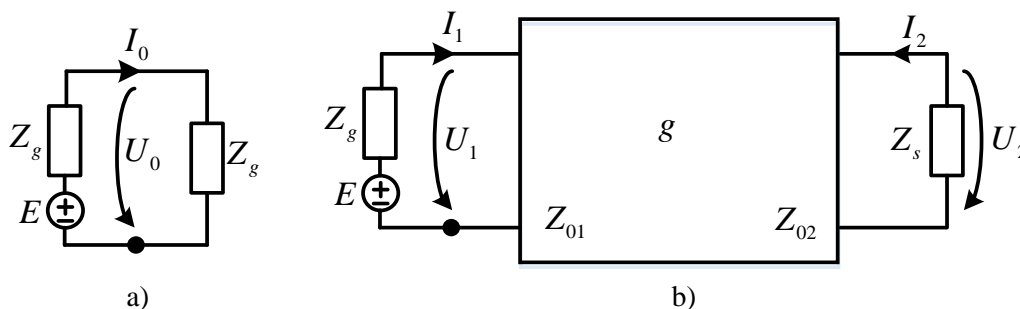


Figura 5

Puterea aparentă complexă absorbită de impedanța  $Z_g$  (situație de referință) este notată cu  $S_0$  și este dată de  $S_0 = U_0 I_0$  (figura 5a), iar puterea aparentă complexă absorbită de sarcina  $Z_s$  (situația reală) este notată cu  $S_2$  și este dată de  $S_2 = -U_2 I_2$  (figura 5b).

Se definește exponentul de transfer, sau de lucru prin:

$$\begin{cases} g_c = \frac{1}{2} \ln \frac{S_0}{S_2} \\ g_c = a_c + j b_c \end{cases} \quad (14)$$

Mărimea  $a_c$  introdusă în (14) este importantă în aplicații și se numește atenuarea compusă a diportului. Atenuarea  $a_c$  se poate exprima și prin formula

$$a_c = \ln \left| \frac{U_0}{U_2} \right| + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{Z_s}{Z_g} \right| \quad (15)$$

care permite măsurarea și pe cale experimentală măsurând numai tensiuni.

Folosind parametrii diportului se pot obține diferite exprimări pentru mărimea  $a_c$ . Este importantă următoarea:

$$a_n = a + a_{n1} + a_{n2} + a_{12} \quad (16)$$

în care:

- $a$  este atenuarea pe imagini  $a = Re(g)$  conform cu (8)
- $a_{n1}$  este atenuarea de neadaptare la poarta 1, atenuare dată de expresia:

$$a_{n1} = \ln \left| \frac{Z_g + Z_{01}}{2\sqrt{Z_g Z_{01}}} \right| \quad (17)$$

- $a_{n2}$  este atenuarea de neadaptare la poarta 2, atenuare dată de expresia:

$$a_{n2} = \ln \left| \frac{Z_s + Z_{02}}{2\sqrt{Z_s Z_{02}}} \right| \quad (18)$$

- $a_{12}$  este atenuarea de interacțiune între intrare și ieșire (reflexiile interne), atenuare dată de:

$$a_{12} = \ln |1 - \rho_1 \rho_2 \cdot e^{-2g}| \quad (19)$$

în care:

$$\rho_1 = \frac{Z_g - Z_{01}}{Z_g + Z_{01}} \quad \rho_2 = \frac{Z_s - Z_{02}}{Z_s + Z_{02}} \quad (20)$$

sunt coeficienții de reflexie la poarta 1 (respectiv 2).

Se remarcă faptul că dacă are loc adaptarea (pe imagini) la o poartă, spre exemplu la poarta 1, se anulează atât  $a_{n1}$  cât și  $a_{12}$  (din  $\rho_1 = 0$ ). În particular dacă  $Z_g = Z_{01}$ ,  $Z_s = Z_{02}$  atunci  $a_c$  se reduce la  $a$ . Totodată se remarcă faptul că dacă atenuarea pe imagini este mare ( $a > 12-15$  dB), termenul  $a_{12}$  se poate neglija.

Atenuarea de neadaptare (pe imagini) poate fi și negativă și deci condiția de transfer maxim de putere este mai tare decât condiția de adaptare.

În al doilea caz situația de referință este cea în care generatorul lucrează pe impedanța de sarcină  $Z_s$ . Situația este arătată în figura 6. Puterea aparentă complexă absorbită de impedanța  $Z_s$  (situația de referință) este notată cu  $S_{0s} = U_0 I_{0s}$  (figura 6a), iar puterea aparentă complexă absorbită de sarcina  $Z_s$  (situația reală) este ca și în cazul precedent notată cu  $S_2 = -U_2 I_2$  (figura 6b).

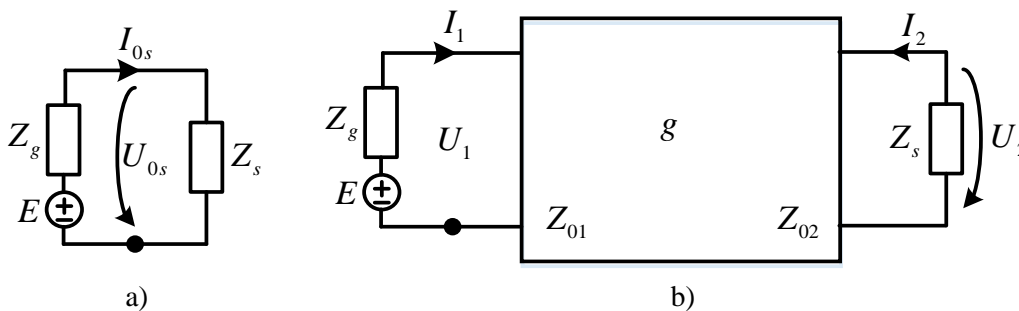


Figura 6

Se definește exponentul de transfer de inserție prin:

$$\begin{cases} g_i = \frac{1}{2} \ln \frac{S_{0s}}{S_2} \\ g_i = a_i + j b_i \end{cases}$$

Mărimea importantă în aplicații este  $a_i$ , denumită atenuare de inserție și se poate exprima prin:

$$a_i = \ln \left| \frac{U_{0s}}{U_2} \right| = \ln \left| \frac{I_{0s}}{I_2} \right| \quad (21)$$

care permite măsurarea ei pe cale experimentală numai prin măsurări de tensiuni.

Legătura dintre atenuarea compusă și atenuarea de inserție este dată de:

$$a_c = a_i + \ln \left| \frac{Z_g + Z_s}{2\sqrt{Z_g Z_s}} \right| \quad (22)$$

#### d) Niveluri și unități de nivel

Fiind dată o putere  $P$ , reală sau aparentă, se numește nivel relativ al puterii  $P$  mărimea:

$$N_p = \frac{1}{2} \ln \frac{P}{P_{ref}} \quad (23)$$

exprimată în neperi (Np). Mărimea  $P_{ref}$  se numește puterea de referință. În mod obișnuit puterea de referință se alege:

$$\begin{aligned} P_{ref} &= 1\text{mW (putere reală)} \\ P_{ref} &= 1\text{mV.A. (putere aparentă)} \end{aligned} \quad (24)$$

Pentru tensiuni și pentru curenți, exprimați în valori efective, niveluri:

$$\begin{aligned} N_u &= \ln \left| \frac{U}{U_{ref}} \right| \\ N_i &= \ln \left| \frac{I}{I_{ref}} \right| \end{aligned} \quad (25)$$

mărimi exprimate în neperi, în care  $U_{ref}$  și  $I_{ref}$  sunt mărimile de referință.

În mod obișnuit,  $U_{ref}$  și  $I_{ref}$  sunt alese astfel încât reprezintă tensiunea, respectiv curentul care asociate unei rezistențe de  $600 \Omega$  conduc la puterea de 1 mW. Se obține:

$$\begin{aligned} |U_{ref}| &= 0,775 \text{ V (valoare efectivă)} \\ |I_{ref}| &= 1,293 \text{ mA (valoare efectivă)} \end{aligned} \quad (26)$$

Legătura între  $N_p$  și  $N_u$  este dată de:

$$N_p = N_u - \frac{1}{2} \ln \frac{600}{|Z|} \quad (27)$$

$|Z|$  fiind modulul impedanței pe care se măsoară tensiunea.

Pentru transformări neper – decibel folosim relația:

$$1\text{Np} = 8,68 \text{ dB} \quad 1\text{dB} = 0,115 \text{ Np}$$



### 3) Desfășurarea lucrării

#### Modul de lucru

Diporții care vor fi studiați sunt diporți rezistivi, adică sunt atenuatoare. Aparatele folosite sunt generatoare de funcții, multimetre, cutii de rezistențe decadice, potențiometri montați pe machete. Se lucrează în curent alternativ la frecvența de 2 kHz.

#### Generatorul de funcții

- 1) Selectarea tipului de funcție generată:
  - se apasă repetat tasta Waveforms, și apoi tasta de sub ecranul generatorului de funcții corespunzător formei de undă dorite (armonic în cazul nostru).
- 2) Fixarea frecvenței de lucru:
  - se apasă tasta de sub ecranul generatorului de funcții corespunzător lui Frequency (până când Frequency e selectat cu albastru);
  - se introduce valoarea 2, apoi se apasă tasta de confirmare corespunzătoare "kHz", de sub ecranul generatorului de funcții
- 3) Fixarea amplitudinii semnalului generat:
  - se apasă tasta de sub ecranul generatorului de funcții corespunzător lui Amplitude (până când Amplitude e selectat cu albastru);;
  - se introduce valoarea dorită, apoi se apasă tasta de confirmare Vpp de sub ecranul generatorului de funcții. Deoarece în lucrare se vor măsura curenți se dorește ca aceștia să aibă valori suficient de mari astfel încât să poată fi ușor măsurate cu aparatele disponibile, fără erori de măsură considerabile. Se recomandă folosirea unor tensiuni egale cu cel puțin 2 V.

A) Se ridică schema electrică a machetei cu atenuatori din laborator.

B) Se vor determina parametrii  $A$  ai primei secțiuni de atenuator conform următoarelor indicații. Parametrii  $A$  se calculează ca rapoarte în care intervin tensiuni și curenți, așa cum rezultă din ecuațiile sistemului prezentat în tabelul 1 (Formalismul A-lanț). Tensiunile se măsoară, în mod obișnuit, cu multimetrul setat pe funcția de voltmetru de curent alternativ (ACV). În ceea ce privește măsurarea curenților, operația se execută indirect măsurând căderea de tensiune pe o rezistență de valoare relativ mică și cunoscută. Cu scopul de a permite măsurarea indirectă a curenților la poarta 1 cât și la poarta 2 pe machetă au fost inserate rezistențele  $R_{a1}$  la poarta 1 și  $R_{a2}$  la poarta 2. Situația este cea din figura 7. Se măsoară cu multimetrul setat ca ohmmetru valorile rezistențelor  $R_{a1}$  și  $R_{a2}$ . În timpul măsurării impedanțelor circuitul nu trebuie să fie alimentat de la nicio sursă de semnal!



Figura 7

Tabelul 3. Determinarea experimentală a parametrilor **A**

Valori măsurate						Valori calculate pe baza măsurătorilor					
Condiția $I_2 = 0$			Condiția $U_2 = 0$			$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{21}$	$A_{22}$	$\Delta A$	$\delta =  1 - \Delta A $
$U_1$	$U_2$	$I_1$	$U_1$	$I_1$	$I_2$						
[V]	[V]	[mA]	[V]	[mA]	[mA]	-	[kΩ]	[mS]	-	-	-

Curenții se calculează prin formulele  $I_k = \frac{U_{ak}}{R_{ak}}$ ,  $k = 1, 2$ . Pentru a se efectua măsurători cu erori minime este necesar ca  $R_{ak}$  să fie mică față de valoarea minimă a rezistenței de intrare care este  $Z_{ksc}$ ,  $k = 1, 2$  ceea ce înseamnă:

$$R_{a1} \leq (0,05 + 0,1)Z_{1sc} \quad R_{a2} \leq (0,05 + 0,1)Z_{2sc}$$

$Z_{1sc}$  și  $Z_{2sc}$  sunt descrise pe pagina 4.

După determinarea valorilor măsurate în condițiile indicate ( $U_k = 0$  – condiție de scurt circuit la poarta  $k$ ,  $I_k = 0$  – condiție de gol la poarta  $k$ ) se vor aplica relațiile (2) particularizate pentru formalismul **A** și se vor determina elementele matricei **A**.

#### Metoda de măsurare:

Condiția de scurt sau gol la poarta  $k$  se va impune după rezistența  $R_{ak}$  de la poarta respectivă (adică între borna A și masă pentru poarta 1 sau între borna B și masă pentru poarta 2. Vezi schema machetei). Generatorul de semnal se va aplica la poarta opusă față de cea la care s-a impus condiția de scurt sau gol, înainte de rezistența  $R_{ak}$  de la poarta respectivă astfel încât aceasta să facă parte din circuit (adică între borna A și masă dacă se aplică la poarta 1 sau între borna B și masă dacă se aplică la poarta 2. Vezi schema machetei). Este evident faptul că generatorul nu se va aplica niciodată la poarta la care trebuie fixată o condiție de scurt sau gol, ci întotdeauna la cealaltă, ținând cont de  $R_{ak}$  conform indicațiilor de mai sus.

De exemplu, în condiția  $I_2=0$  se va lăsa poarta 2 în gol (nu se va conecta nimic între borna B și masă), iar generatorul se va aplica la cealaltă poartă (adică poarta 1) înainte de  $R_{a1}$  (între masă și borna A). Se vor măsura  $U_1$  (între bornele 1 și 1'),  $U_2$  (între bornele 2 și 2') direct, iar  $I_1$  indirect prin măsurarea tensiunii pe rezistența  $R_{a1}$  (care va fi numită  $U_{a1}$ ) și apoi prin împărțirea ei la valoarea rezistenței  $R_{a1}$ , exact cum este arătat în primul paragraf din această pagină . Se procedează similar în condiția următoare. Toate bornele de tip N' (1', 2') reprezintă puncte de masă în cazul machetei din cadrul acestei lucrări de laborator.

Rezultatele se vor trece în tabelul 3.

Se calculează determinantul matricei **A** notat cu  $\Delta A$ . Eroarea notată cu  $\delta$  admisă în raport cu relația de reciprocitate este  $\delta \leq 5\%$  adică  $|1 - \Delta A| \leq 0,05$ .

C) Se determină experimental parametrii **Z** ai primei secțiuni de atenuator. Metoda este aceeași ca la punctul B. Rezultatele se vor trece în tabelul 4. Parametrii corespunzători sunt rapoarte în care intervin curenți și tensiuni așa cum rezultă din ecuațiile sistemului prezentat în tabelul 1 (Formalismul **Z**-impedanță). Aceștia se măsoară așa cum s-a arătat la punctul anterior. Se calculează mărimea  $\delta = (Z_{12} - Z_{21})/Z_{12}$ , care reprezintă eroarea față de condiția de reciprocitate. Eroarea admisă este  $\delta \leq 5\%$ .

Tabelul 4

Valori măsurate						Valori calculate pe baza măsurătorilor				
Condiția $I_2 = 0$			Condiția $I_1 = 0$			$Z_{11}$	$Z_{12}$	$Z_{21}$	$Z_{22}$	$\frac{ Z_{12} - Z_{21} }{Z_{12}}$
$U_1$	$U_2$	$I_1$	$U_1$	$U_2$	$I_2$					
[V]	[V]	[mA]	[V]	[V]	[mA]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	-

D) Considerând ca adevărați parametrii  $A$  determinați la al doilea punct, să se determine folosind relațiile de trecere date în tabelul 2 (există egalitate între matricele de pe aceeași linie), parametrii  $Z'_{ij}$  (indicele prim indică faptul că parametrii sunt determinați indirect prin calcul pornind de la alt formalism). Să se calculeze erorile relative dintre valorile determinate indirect și cele măsurate direct la punctul C.

$$\delta_{ij} = \frac{|Z'_{ij} - Z_{ij}|}{Z_{ij}}, \quad i, j = 1, 2$$

$$\delta_{ij} = \frac{|Z'_{ij} - Z_{ij}|}{Z_{ij}}, \quad i, j = 1, 2. \quad \text{Eroarea admisă este } \delta_{i,j} \leq 5\%$$

E) Pe baza parametrilor  $A$  determinați la punctul B să se calculeze impedanțele imagine  $Z_{01}$  și  $Z_{02}$  folosind formulele (3) și atenuarea pe imagini  $g$  folosind formula (9).

F) Se realizează montajul din figura 3, în care  $Z_{01}$  și  $Z_{02}$  reprezintă impedanțele imagine calculate la punctul E. La poarta 1 trebuie să se conecteze un generator ideal de tensiune înseriat cu  $Z_{01}$ , iar la poarta 2 trebuie să se conecteze o rezistență cu valoare egală cu  $Z_{02}$ . În realitate, generatorul are o impedanță de ieșire, înscrisă lângă borna de ieșire, egală cu  $Z_g = 50 \Omega$ . Așadar, pentru a obține situația de la poarta 1 descrisă în figura 3 trebuie să se însereze cu generatorul real (existent în laborator) o rezistență egală cu  $Z_{01} - 50 \Omega$  ( $Z_{01}$  determinat prin calcul la punctul E). În acest sens se scoate generatorul din circuit și se măsoară folosind multimetrul setat pe ohmmetru rezistența dintre bornele C și C' (vezi schema machetei) care reprezintă valoarea la care este reglat potențiometrul P1. Se reglează valoarea acestuia la  $Z_{01} - 50 \Omega$ . Se procedează similar pentru reglarea valorii potențiometrului P2 la  $Z_{02}$  calculată la punctul E. Bornele potențiometrului P2 sunt D și D'. Se deconectează ohmmetrul și se conectează generatorul între masă și borna C (s-a obținut situația din figura 3 la poarta 1). Se conectează borna D la borna 2 a primei secțiuni de atenuator și borna D' la borna 2' (adică la masă) (s-a obținut și situația de la poarta 2 descrisă în figura 3). Se măsoară tensiunile  $U_1$  (între bornele 1 și 1') și  $U_2$  (între bornele 2 și 2'). Se calculează atenuarea pe imagine  $g'$  folosind formula (8) bazată pe  $U_1$  și  $U_2$ . Se compară mărimea  $g'$  cu  $g$  calculat la punctul precedent evaluându-se eroarea  $\delta = \left| \frac{g' - g}{g} \right|$ . Valoarea admisă este de  $\delta \leq 5\%$ . Se alimentează diportul la poarta 2 și se determină, măsurând  $U_2$  și  $U_1$ , exponentul de transfer pe imagini în sens invers  $g''$ . Se determină eroarea în raport cu  $g$ ,  $\delta = \left| \frac{g'' - g}{g} \right|$ . Valoarea admisă este de  $\delta \leq 5\%$ .

G) Se vor studia în continuare proprietățile descrise în figura 2, pentru atenuatorul 1. Pentru situația din figura 2 (stânga): se deconectează generatorul de funcții, iar la poarta 2 se conectează o rezistență cu valoarea egală cu  $Z_{02}$ , folosind potențiometrul P2, calculată la punctul E. Se măsoară cu multimetrul, pe poziția ohmmetru, impedanța de intrare la poarta 1 (între bornele 1 și 1') și se notează aceasta cu  $Z'_{01}$ . Se realizează situația din figura 2 (dreapta): se deconectează potențiometrul P2. Se observă că la poarta 1 trebuie conectată o rezistență cu valoarea egală cu  $Z_{01}$  calculat la punctul E. Acest lucru se poate face prin reglarea valorii rezistenței potențiometrului P1 (între bornele C și C' ca

la punctul anterior) la  $Z_{01}$  (nu la  $Z_{01} - 50 \Omega$  cum este deja) și apoi prin conectarea bornei C la masă. Se observă ca situația din figura 2 (dreapta) s-a obținut. Se măsoară impedanța imagine de intrare la poarta 2 (între bornele 2 și 2') și se notează aceasta cu  $Z'_{02}$ . Se compară cu situația asociată funcționării pe impedanțe imagini calculând erorile:

$$\delta_1 = \left| \frac{Z'_{01} - Z_{01}}{Z_{01}} \right| \quad \text{și} \quad \delta_2 = \left| \frac{Z'_{02} - Z_{02}}{Z_{02}} \right|$$

Valori admise  $\delta_{1,2} \leq 5\%$ .

H) Se determină experimental impedanțele imagine pentru cele trei secțiuni de atenuator. Metoda este următoarea: Se măsoară cu multimetrul  $Z_{1g}$ ,  $Z_{2g}$ ,  $Z_{1sc}$ ,  $Z_{2sc}$  (vezi pagina 4) și se calculează  $Z_{01}$  și  $Z_{02}$  folosind formulele (3). Se calculează apoi exponentul de transfer pe imagini folosind formulele (10) efectuând funcția arctangent hiperbolic. Rezultatele se trec în tabelul 5.

Tabelul 5 Determinarea experimentală a parametrilor folosind impedanțele de scurt și gol

	$Z_{1g}$	$Z_{2g}$	$Z_{1sc}$	$Z_{2sc}$	$Z_{01}$	$Z_{02}$	$g_k$
	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[Np]
Atenuator 1							
Atenuator 2							
Atenuator 3							

I) Se conectează în cascadă cele trei secțiuni de atenuator și se alimentează astfel încât diportul rezultat să lucreze pe imagini (vezi figura 4 și descrierea de sub aceasta). Se măsoară atenuarea pe imagini  $g'$  a diportului considerat. Pentru aceasta se deconectează generatorul și se reglează valoarea rezistenței potențiometrului P1 la  $Z_{01} - 50 \Omega$  ( $Z_{01}$  a primului atenuator), valoarea rezistenței potențiometrului P2 la  $Z_{02}$  a ultimului atenuator. Se conectează generatorul între borna C și masă. Se conectează potențiometrul P2 la poarta 2 a ultimei secțiuni de atenuator. Se măsoară  $U_1$  la poarta 1 a primei secțiuni de atenuator și  $U_2$  la poarta 2 a ultimei secțiuni de atenuator. Se determină  $g'$  și se evaluează eroarea față de situația precisă de teorie  $\delta = \left| \frac{g' - (g_1 + g_2 + g_3)}{g'} \right|$  în care  $g_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  au fost calculate la punctul H. Eroarea admisă este  $\delta \leq 5\%$ .

J) Se alimentează prima secțiune de atenuator în condițiile  $Z_g = 600 \Omega$ ,  $Z_s = 1000 \Omega$ . Se determină experimental atenuarea de inserție  $a_i$  și atenuarea compusă  $a_c$ . Pentru măsurarea atenuării de inserție,  $Z_g$  și  $Z_s$  fiind cele prescrise, se realizează montajul din figura 6a: se deconectează generatorul, se reglează valoarea rezistenței potențiometrului P1 la  $Z_g - 50 \Omega$ , deoarece se va folosi un generator real care are o impedanță de ieșire de  $50 \Omega$ . Se reglează valoarea rezistenței potențiometrului P2 la  $Z_s$ . Se conectează generatorul între borna C și borna D'. Se interconectează bornele C' și D folosind un fir de legătură. Se determină dacă s-a obținut situația din figura 6a, se identifică și se măsoară tensiunea  $U_{0s}$ . Se deconectează toate legăturile pentru a realiza montajul din figura 6b. Se conectează generatorul între C și masă, se conectează poarta 2 a atenuatorului 1 la borna D și borna D' la masă. Se determină dacă s-a obținut situația din figura 6b, se identifică și se măsoară tensiunea  $U_2$ . Se calculează  $a_i$  cu formula (21).

Pentru a măsura atenuarea compusă, la acești  $Z_g$  și  $Z_s$ , se procedează similar și se măsoară  $U_0$  în montajul din figura 5a și tensiunea  $U_2$  în montajul din figura 5b. Mărimea  $a_c$  se determină cu formula (15).

K) Se calculează atenuarea compusă  $a'_c$  folosind relația (16) și se compară cu cea experimentală, calculată la punctul J,  $\delta = \left( \frac{a'_c - a_c}{a_c} \right)$ , eroarea admisă este  $\delta \leq 5\%$ .

#### 4) Întrebări

- A) Câți parametri sunt necesari pentru caracterizarea unui diport: oarecare, reciproc, simetric?  
 B) În ce caz condiția de adaptare coincide cu condiția de transfer maxim de putere?  
 C) Găsiți un exemplu în care atenuarea de neadaptare este negativă.  
 D) Care dintre atenuările introduse depind de sensul de propagare a puterii în diport?

#### 5) Aplicații

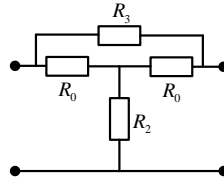


Figura 7

- A) Se consideră circuitul din figura 7 în care se impune condiția  $R_2 R_3 = R_0^2$ .
- Să se determine impedanța caracteristică;
  - Impunând o anumită atenuare pe imagini  $K$ , să se determine  $R_2$  și  $R_3$ . Aplicație  $R_0 = 600 \Omega$ ,  $K = 10$ .

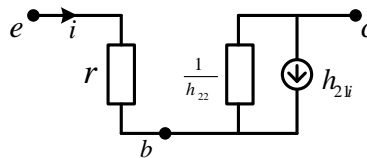


Figura 8

- B) Se consideră circuitul echivalent al unui tranzistor, figura 8.
- Să se determine parametrii  $\mathbf{A}$  și să se arate că diportul nu este reciproc.
  - Să se determine impedanțele imagine.
  - Să se determine atenuarea pe imagini în ambele sensuri.
- C) Se consideră un generator descris de  $U_1 = R_0 I_2$  și  $U_2 = -R_0 I_1$
- Să se determine parametrii  $\mathbf{A}$  și să se arate că diportul nu este reciproc.
  - Să se determine impedanțele imagine.
  - Să se determine atenuarea pe imagini în ambele sensuri.
- D) Se consideră prima secțiune de atenuator. Să se ridice schema și să se măsoare rezistențele.
- Să se determine experimental parametrii  $\mathbf{A}$  pornind de la definiție și valorile rezistențelor.
  - Să se compare rezultatele (eroarea).
- E) Se consideră prima secțiune de atenuator. Să se ridice schema și să se măsoare rezistențele.
- Să se calculeze  $Z_{01}$  și  $Z_{02}$  măsurând impedanțele de scurt și de gol.
  - Să se verifice experimental rezultatele.
- F) Se consideră prima secțiune de atenuator. Să se ridice schema și să se măsoare rezistențele
- Să se calculeze  $Z_{01}$  și  $Z_{02}$  precum și atenuarea pe imagini.
  - Determinați experimental atenuarea pe imagini și comparați rezultatele experimentale cu cele teoretice.
- G) Se consideră trei atenuatoare. Ridicați schemele și măsurați rezistențele.
- Să se calculeze  $Z_{01}$  și  $Z_{02}$  și să se realizeze adaptarea pe imagini. Calculați atenuarea pe imagini totală. Verificați experimental rezultatele teoretice.