



UNIVERSITATEA TEHNICĂ CLUJ-NAPOCA

DEPARTAMENTUL ELECTROTEHNICĂ ȘI MĂSURĂRI

Cursul 4 LINII DE TRANSMISIE

Introducere curs	În acest curs sunt prezentate noțiuni referitoare la liniile de transmisie.
Obiective curs	- Introducere în problematica liniilor de transmisie; - Modelul echivalent al circuitului electric; - Fenomene care însoțesc transferul unui semnal printr-o linie de transmisie; întârzierea, reflexia, dispersia, coliziunea.
Durată medie de studiu individual	Durata medie de studiu individual: 100 minute. Acest interval de timp presupune parcurgerea conținutului cursului și rezolvarea testelor de autoevaluare

Cuprins:

4.1.	Introducere.	1
4.2.	Modelul echivalent al circuitului electric.	1
4.3.	Fenomene care însoțesc transferul unui semnal printr-o linie de transmisie.	3
4.3.1.	Întârzierea.....	3
4.3.2.	Reflexia. Modelul ghidului de undă.	4
4.3.3.	Dispersia.....	7
	TESTE DE AUTOEVALUARE.....	10
	RĂSPUNSURI.....	Error! Bookmark not defined.
	Bibliografie	11

4.1. Introducere.

În cazul utilizării pentru transmisie a conductoarelor electrice, indiferent de tehnologia folosită, apar probleme majore legate de comportarea acestora față de semnalele electrice, de frecvență mare. Aceste conductoare, de cele mai multe ori de lungime mare (de la zeci de metri până la sute sau mii de kilometri), se comportă asemănător unor cuadripoli, dar cu parametri distribuiți. Lucrarea de față nu își propune o abordare extinsă asupra acestui subiect, ci doar o prezentare simplificată, care să permită înțelegerea intuitivă a fenomenelor care însoțesc transmisia semnalelor prin liniile electrice lungi, numite în acest context **linii de transmisie**.

4.2. Modelul echivalent al circuitului electric.

După cum îi spune și numele, o **linie de transmisie** este un **grup de conductoare** folosite pentru **transmiterea informațiilor** sub formă de **semnale electrice** [1].

În general fiecare conexiune, sau circuit electric; poate fi considerat ca o linie de transmisie, cu condiția să fie cu geometrie uniformă și structură omogenă a materialelor componente. Aceasta înseamnă că forma, mărimea și suprafața conductoarelor sunt constante, iar caracteristicile electrice ale conductoarelor și cele dielectrice ale materialelor dintre ele, sunt uniforme.

Exemple de linii de transmisie uniforme sunt cablurile coaxiale și perechile de conductoare răsucite. O problemă asemănătoare apare și în cazul circuitelor imprimate și al celor integrate, unde se vorbește despre „*strip lines*” și „*microstrip*”.

Într-un circuit simplu, al unei linii de transmisie, sursa generează un semnal care se transmite spre sarcină.

Impedanța caracteristică a unei linii de transmisie.

În **figura 4.1** se prezintă câteva dintre modelele simplificate ale liniilor de transmisie, asociate unei perechi de conductoare, astfel:

- modelul ideal;
- modelul de circuit cu parametri R , L , C distribuiți;
- modelul simplificat, cu parametri distribuiți și pierderi neglijabile.

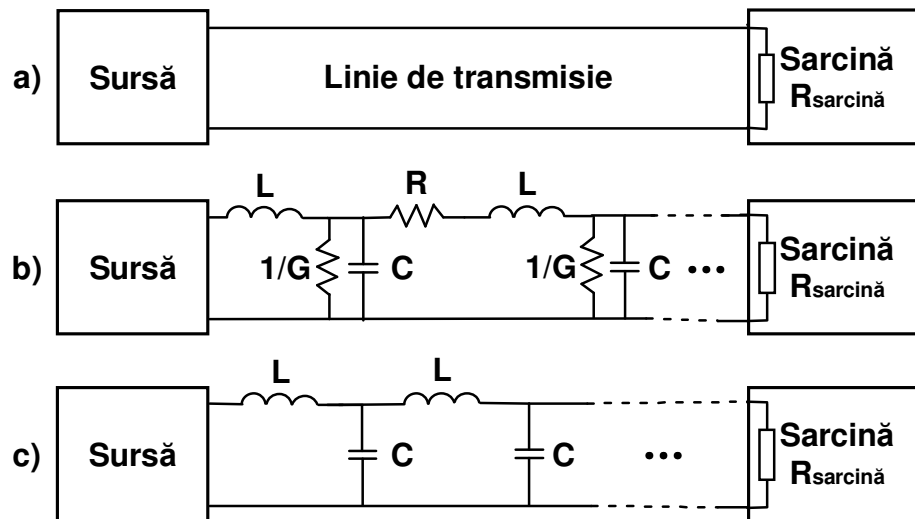


Fig. 4.1. Modelele simplificate ale unei linii de transmisie.

În primul mod de abordare a circuitului se presupune că firele, care alcătuiesc linia de transmisie sunt ideale, adică potențialul în oricare punct, aparținând unui conductor, este același. În realitate, această situație nu este adevărată, orice conductor real are o componentă activă (de pierderi) și una reactivă.

Componenta activă este reprezentată printr-o rezistență R , așezată în serie cu circuitul și una egală cu $1/G$ în paralel, distribuite uniform de-a lungul circuitului.

Componenta reactivă este reprezentată de inductivitatea L și capacitatea C care apare între fiecare pereche de fire reale. Datorită polarizării electrice, în dielectricul cu care sunt înconjurte firele, apar fenomene de conducție și pierderi, care se materializează prin conductanța de valoare mică (rezistență mare), G .

Acești parametri se presupun a fi uniform distribuiți, în fiecare segment elementar din lungimea conductoarelor și de aceea se numesc **parametrii distribuiți**, sau **parametrii lineici**. Se exprimă în unități naturale, specifice mărimilor respective, raportate la unitatea de lungime (metrul) Ω/m , H/m , F/m și S/m . Deoarece valorile parametrilor lineici sunt foarte mici, unitățile de măsură se folosesc cu prefixe de submultipli, $m\Omega/m$, $\mu H/m$, pF/m și $\mu S/m$.

Linia de transmisie se poate modela folosind un model simplu de circuit care conține un număr finit de elemente R, L, C și G , așa cum se poate vedea în **figura.4.1 b**.

Pentru simplificarea modelului trebuie avute în vedere următoarele condiții:

- la transmisia semnalelor de date, se folosesc circuite cu ieșiri în curent, care compensează căderile de tensiune de-a lungul circuitului serie.
- pentru izolarea conductoarelor se utilizează materiale de calitate la care pierderile din dielectric sunt mici.

Ținând cont de acestea, componentele active (de pierderi) R și $1/G$ se pot neglija, ceea ce permite obținerea modelului din **figura 4.1 c)** care conține doar componentele L și C . O linie de transmisie care se presupune ca nu are pierderi se numește **linie de transmisie ideală**.

Chiar și în condițiile modelului simplificat, prezența componentelor reactive L și C , care înmagazinează energie, face ca potențialele în diferite puncte, distribuite de-a lungul conductoarelor, să fie diferite. Un semnal, transmis de sursă, face ca parametrii distribuiți L și C să se încarce și descarce periodic, ceea ce face ca semnalul să nu ajungă instantaneu la destinație, ci cu o anumită întârziere.

Comportarea semnalului transmis, la parcurgerea circuitului, depinde nu doar de impedanța sursei și sarcini, ci și de valorile parametrilor lineici L și C . Una dintre cele mai importante probleme este modul cum reacționează acest circuit în funcție de frecvență, reactanța inductivă și cea capacitivă fiind dependente de aceasta. La frecvențe mici, parametrii L și C introduc întârzieri și impedanțe neglijabile, reducând modelul la o singură pereche de fire ideale. La frecvențe înalte, efectele parametrilor L și C devin dominante și nu pot fi ignorate.

Pentru a demonstra comportarea unei linii de transmisie se poate considera circuitul simplu din **figura 4.2**. În acest circuit, o sursă de tensiune (în cazul de față 5 volți) este conectată la o sarcină activă, formată din rezistorul R , printr-o linie de transmisie care are în componența sa 4 cuadripoli elementari formați din câte o inductanță L și un capacitor C . În realitate, o linie de transmisie reală trebuie considerată ca o succesiune infinită de astfel de cuadripoli elementari.

Între sursa de alimentare și linia de transmisie este un întreruptor mecanic, care este inițial deschis, adică potențialul oricărui punct de pe linie este nul, ca și curentul prin sarcina R . Imediat după închiderea întreruptorului, curentul injectat în linia de transmisie începe să crească, încărcând circuitul magnetic al primei inductanței L și primul capacitor C . Capacitorul continuă să acumuleze sarcină electrică până când tensiunea la bornele sale ajunge egală cu tensiunea la bornele sursei (5 V). În timpul acestui proces, o parte din energia electrică generată de sursă este transferată câmpului magnetic al inductanței. Când tensiunea la bornele primului capacitor începe să crească, începe transferul de energie spre al doilea cuadripol.

În timpul încărcării capacitivelor și inductanțelor, curentul prin sarcină este nul, impedanța, pe care o “vede” sursa de alimentare, este dependentă doar de valoarea impedanțelor distribuite. Aceasta impedanță poartă numele de “impedanță caracteristică” a liniei de transmisie și se poate calcula ușor cu relația 1.

$$z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

În realitate, liniile de transmisie au și componente active, de pierderi, ceea ce face ca impedanța caracteristică, pentru o linie de transmisie cu pierderi să se determine cu relația 2.

$$z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (2)$$

unde ω pulsația tensiunii aplicate la bornele liniei și j este fazorul componentei reactive.

4.3. Fenomene care însoțesc transferul unui semnal printr-o linie de transmisie.

4.3.1. Întârzierea.

Fenomenul de întârziere la propagarea unui semnal electric printr-un mediu se poate face pornind de la reprezentarea unei linii de transmisie și a modului în care se transmite semnalul, între sursă și destinație [1].

Pentru a înțelege procesul transmiterii la distanță a unui semnal electric, trebuie analizate următoarele etape:

a) Întreruptorul este deschis, curentul prin linie este 0, tensiunea în oricare punct aflat de-a lungul liniei este zero.

b) Întreruptorul este închis, tensiunea la bornele liniei este egală cu tensiunea de alimentare, curentul începe să crească și să încarce primul cuadripol LC .

$$I = \frac{U_s}{Z_0}, \text{ unde } Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

c) primul cuadripol s-a încărcat în prima etapă, iar acum se încarcă, pe rând, celelalte până când s-a încărcat toată linia. În acest moment, intensitatea curentului transmis de sursă ajunge la valoarea I .

d) după ce s-a încărcat toată linia de transmisie, curentul absorbit de aceasta devine 0, sursa debitând doar curentul care trece prin rezistența R a sarcinii, a cărei valoare staționară devine:

$$I_R = \frac{U_s}{R_s} \quad (4)$$

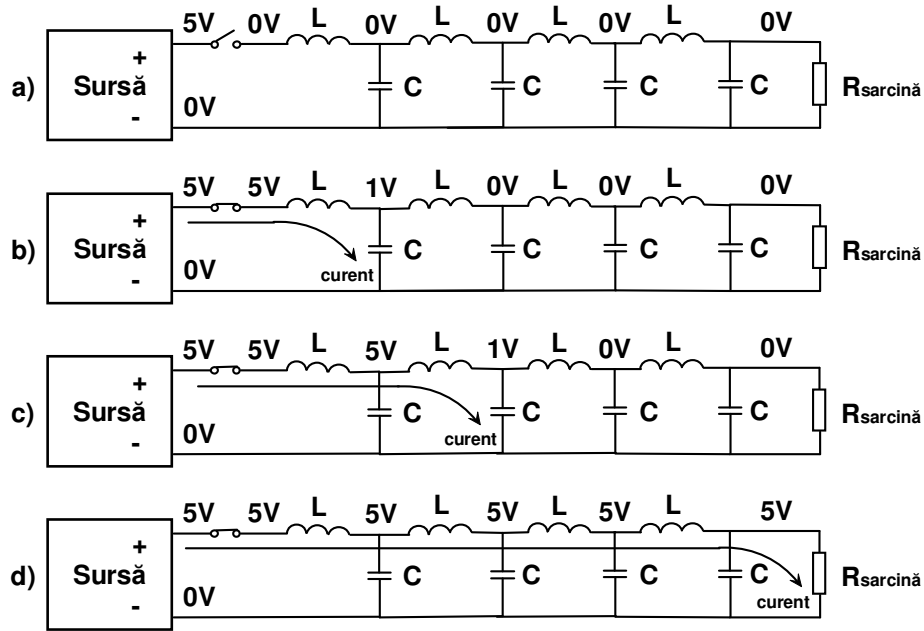


Fig. 4.2. Întârzierea unui semnal, transferat printr-o linie de transmisie, datorită impedanței caracteristice.

În timp ce linia de transmisie se încarcă, energia este luată de la sursă și transferată în câmpul magnetic al inductanțelor și în câmpul electric al capacitoarelor distribuite. Timpul de încărcare a unei linii de transmisie este direct proporțional cu lungimea ei. Pentru o linie de transmisie foarte lungă, de sute de metri sau kilometri, aceste efecte sunt semnificative și nu pot fi neglijate. Să presupunem că avem un cablu foarte lung a cărui impedanță caracteristică este de 50Ω , iar rezistența sarcinii cuplată la celalalt capăt al firului este 1000Ω . Dacă se conectează un ohmmetru la linie, pentru un interval scurt de timp, acesta va indica 50Ω - valoarea impedanței caracteristice a cablului, iar după încărcarea liniei de transmisie și amortizarea oscilațiilor datorate regimului tranzitoriu, ohmmetrul va afișa 1.000Ω .

Pentru un cablu de **1 m**, timpul de parcurgere este de câteva nanosecunde, neglijabil pentru cele mai multe dintre aplicații, dar semnificativ pentru cazul în care se transmit semnale de frecvență mare.

4.3.2. Reflexia. Modelul ghidului de undă.

O altă metodă, pentru descrierea funcționării liniilor de transmisie, este acela al ghidului pentru conducerea undelor electromagnetice. În această metodă de analiză, sursa transmite spre sarcină semnalul electromagnetic, printr-un mediu omogen, așa cum se poate vedea în **figura 4.3** [1].

Undele de tensiune corespund câmpului electric, iar undele de curent celui magnetic. Linia de transmisie, considerată un mediu omogen, conduce semnalul între sursă și destinație cu o viteză v egală cu viteza luminii în mediul respectiv. Aceasta depinde de permitivitatea dielectrică ϵ și de permeabilitatea magnetică μ a materialului izolator dintre conductoare.

$$v = \sqrt{\frac{1}{\epsilon\mu}} \quad (5)$$

Fig. 4.3. Modelul ghidului de undă.

De exemplu, dacă se folosește ca material pentru învelișul izolator al cablurilor politertrafluoretilena (teflonul), a cărei permitivitate dielectrică relativă este $\epsilon_r = 2,08$ și permeabilitatea magnetică relativă $\mu_r \approx 1$, undele parcurg mediul cu viteza v_{PTFE} , așa cum se poate vedea în relația 6.

$$v_{PTFE} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \cdot c = \frac{1}{\sqrt{2,08 \cdot 1}} \cdot c = 0,6933 \cdot c \quad (6)$$

Termenul se numește coeficient de „scurtare”, și reprezintă coeficientul cu care trebuie înmulțită lungimea de undă în vid pentru a obține lungimea de undă în mediul respectiv. Când semnalul parcurge linia de transmisie, undele de tensiune și de curent definesc starea sistemului în fiecare punct.

Se consideră un semnal sinusoidal care străbate linia de transmisie cu valori ale tensiunii și ale intensității curentului prezentate în **figura 4.4**. De-a lungul întregii linii, în fiecare punct, raportul dintre valoarea tensiunii și a intensității curentului este constant și egal cu impedanța caracteristică Z_0 . Aceasta este definită de geometria liniei și de caracteristicile electrice ale materialelor și se poate calcula cu relația 7.

$$Z_0 \cong \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{D}{d} \right] \quad (7)$$

Unde d este diametrul conductorului, D este diametrul exterior al izolației conductorului și ϵ_r este permitivitatea dielectrică relativă a materialului din izolație.

În **figura 4.4** se prezintă variația în timp a unui impuls electric, reprezentat prin componentele de tensiune și curent, în deplasarea sa de-a lungul liniei de transmisie.

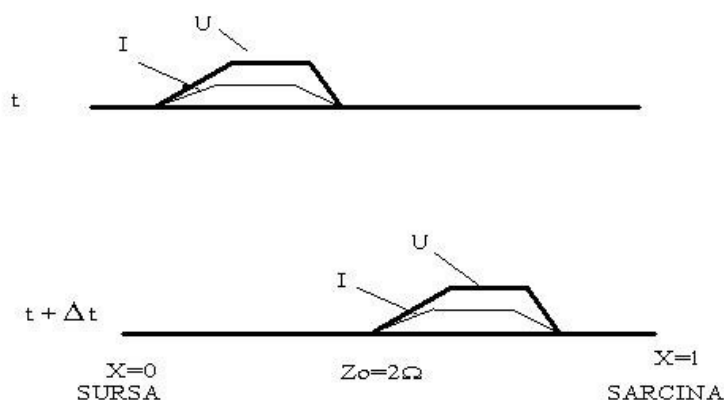


Fig. 4.4. Variația în timp a unui impuls electric.

Reflexia.

De fiecare dată când o undă electromagnetică întâlnește un punct în care a apărut o schimbare a proprietăților mediului, în cazul de față al impedanței caracteristice, o parte din energia semnalului este transmisă mai departe, iar alta este reflectată spre sursă, așa cum se poate vedea în **figura 4.5**.

Pentru înțelegerea acestui fenomen este util să se considere că frontiera dintre cele două regiuni, cu impedanțe diferite, se comportă ca o oglindă semitransparentă.

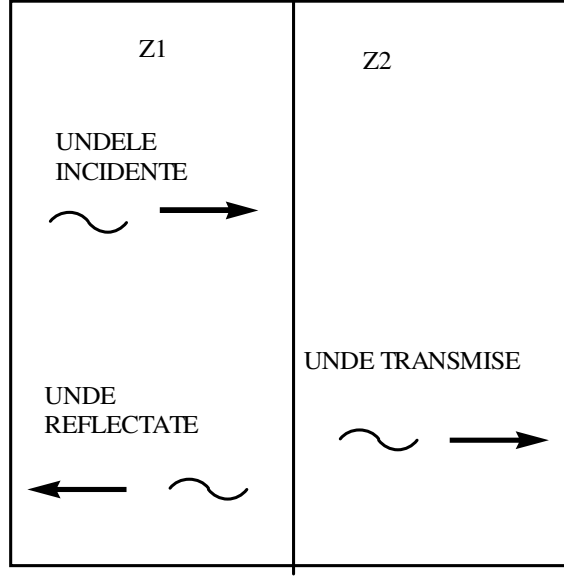


Fig. 4.5. Apariția reflexiilor la frontiera dintre două regiuni cu impedanțe caracteristice, Z_1 și Z_2 , diferite.

Modificarea impedanței liniilor de transmisie determină modificarea amplitudinii unde incidente. Raportul dintre amplitudinea unei reflectate și a celei incidente se numește coeficient de reflexie ρ_u și se calculează cu relația 8.

$$\rho_u = \frac{U_{reflectat}}{U_{incident}} = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0} \quad (8)$$

unde Z_S este impedanța sarcinii.

Raportul dintre amplitudinea unei transmise și cea a unei incidente se numește coeficient de transmisie τ_u și se calculează cu relația 9.

$$\tau_u = \frac{U_{transmis}}{U_{incident}} = 1 + \rho_u \quad (9)$$

În mod asemănător se pot defini coeficienții de reflexie și de transmisie pentru componenta de curent a unei transmise. Relațiile care descriu coeficienții de reflexie ρ_I și de transmisie τ_I , pentru componenta de curent, sunt următoarele:

$$\rho_I = \frac{I_{reflectat}}{I_{incident}} = -\rho_u \quad (10)$$

Coeficientul de transmisie este:

$$\tau_I = \frac{I_{transmis}}{I_{incident}} = 1 + \rho_I \quad (11)$$

Puterea totală reflectată este:

$$P_R = \frac{P_{reflectat}}{P_{incident}} = |\rho_u|^2 \quad (12)$$

Puterea totală transmisă este:

$$P_T = \frac{P_{transmis}}{P_{incident}} = 1 - P_R \quad (13)$$

Aplicând legea conservării energiei, suma dintre puterea transmisă și cea reflectată este egală cu puterea incidentă.

Trebuie evidențiat faptul că fenomenul reflexiei este independent de frecvența semnalului și apare la orice schimbare a parametrilor liniei de transmisie (permitivitatea și permeabilitatea magnetică a materialelor dielectrice).

Dacă nu apar fenomene accentuate de îmbătrânire a materialelor din care sunt construite mediile de transmisie, parametrii distribuți (lineici) pot fi considerați constanți. Cu toate acestea, se pot întâlni situații în care materialele dielectrice se pot contamina cu apă, sau alte soluții lichide, care modifică valoarea permitivității dielectrice.

Modificări ale condițiilor de transmisie se pot întâlni și în cazul punctelor de înădare sau de întrerupere a conductoarelor, chiar dacă acest lucru nu se observă din punct de vedere electrocinetic, prin măsurare cu ohmmetrul.

La capătul unei linii, sau în punctele de întrerupere, valoarea impedanței caracteristice crește foarte mult (spre infinit). Se observă că pentru evitarea fenomenului de reflexie ρ_u trebuie să fie egal cu zero, ceea ce se întâmplă când $Z_S = Z_0$. Pentru aceasta, capătul fiecărei linii de transmisie trebuie să aibă o impedanță egală cu cea a liniei sau este nevoie ca circuitul echipamentului, care materializează sarcina, să aibă o impedanță de intrare egală cu impedanța caracteristică a liniei. În cazul conectării la un mediu de transmisie a mai multor echipamente, cu impedanță mare de intrare, este nevoie ca mediul de transmisie să fie șuntat la capete cu câte un rezistor, numit terminator, a cărui rezistență electrică să fie egală cu impedanța caracteristică a liniei, așa cum se poate vedea în **figura 4.6**.

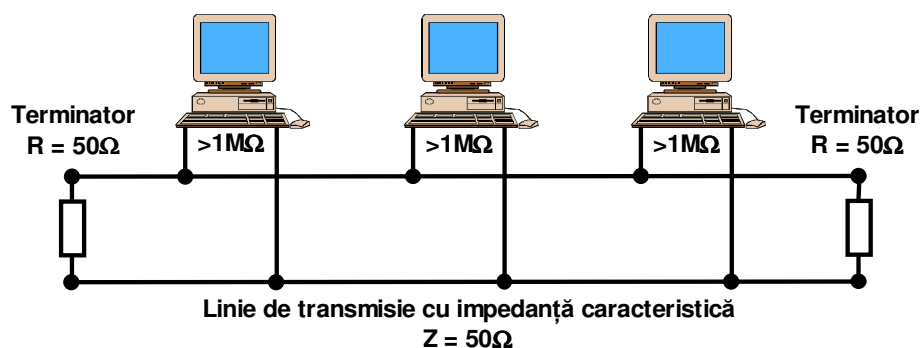


Fig. 4.6. Utilizarea terminatoarelor pentru închiderea, la capete, a unei linii de transmisie.

În cazul conectării directe a unor echipamente de comunicație, impedanța de ieșire a circuitelor din sursa de semnal, impedanța caracteristică a liniei de transmisie și impedanța de intrare a echipamentului destinație, trebuie să fie egale, așa cum se poate vedea în **figura 4.7**.

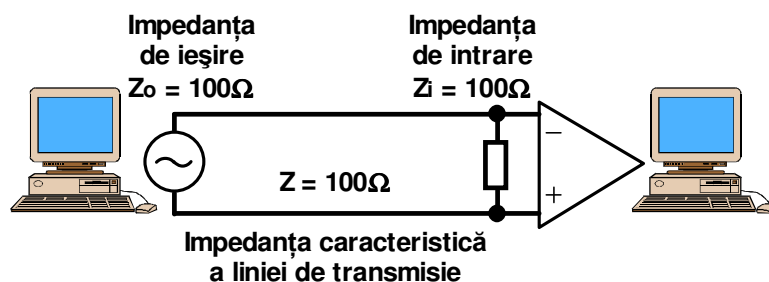


Fig. 4.7. Adaptarea impedanțelor, de intrare și ieșire, la conectarea a două echipamente.

4.3.3. Dispersia.

Un semnal dreptunghiular $s(t)$ este reprezentat printr-o serie infinită de componente armonice, așa cum se poate vedea în relația 14.

$$s(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cos(2k+1)2\pi f_k t}{2k+1} \quad (14)$$

unde k este un număr întreg și pozitiv, iar f_k este frecvența componentei armonice de ordinul k .

Dacă se analizează proprietățile electrice ale materialelor din care este construită o linie de transmisie, se observă că permitivitatea dielectrică, a materialului din învelișul conductoarelor, variază cu frecvența de polarizare electrică. În **tabelul 4.1.** se prezintă valorile permitivității dielectrice pentru diferite materiale.

Tabelul 4.1.

Material / Frecvență	Permitivitatea dielectrică			
	50Hz	1kHz	1MHz	1GHz
PTFE (teflon)	2,08	2,08	2,08	-
PVC	-	3 – 3,3	2,8 – 3,1	2,8
PE	-	2,2	2,2	2,2

De aici se observă că la unele materiale, folosite pentru izolarea conductoarelor, permitivitatea dielectrică scade cu creșterea frecvenței. Pe de altă parte, pierderile care apar în materialul liniei de transmisie sunt dependente de frecvență, ceea ce face ca atenuarea diferitelor componente armonice transmise să nu fie aceeași, așa cum se poate vedea în **figura 4.8.**

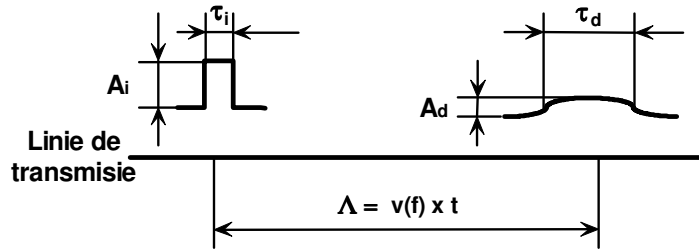


Fig. 4.8. Dispersia unui semnal, de-a lungul unei linii de transmisie.

Dispersia influențează negativ calitatea semnalelor transmise, existând riscul ca acestea să nu mai poată fi recepționate corect, la destinație. Pentru a evita acest lucru, este nevoie de montarea, de-a lungul circuitelor de transmisie, a unor repetitoare de semnal. Rolul acestor repetitoare este de a amplifica semnalele primite și de a le forma în timp, cu o durată de ceas egală cu cea avută în momentul transmisiei.

Coliziunea.

Coliziunile apar în situația în care două surse, conectate la același mediu de propagare, transmit simultan semnale. Acestea interferează, generând un semnal rezultat din care nu se mai poate extrage informația transmisă și care nici nu mai are aceleași caracteristici, de amplitudine și durată, cu cele inițiale (**figura 4.9**).

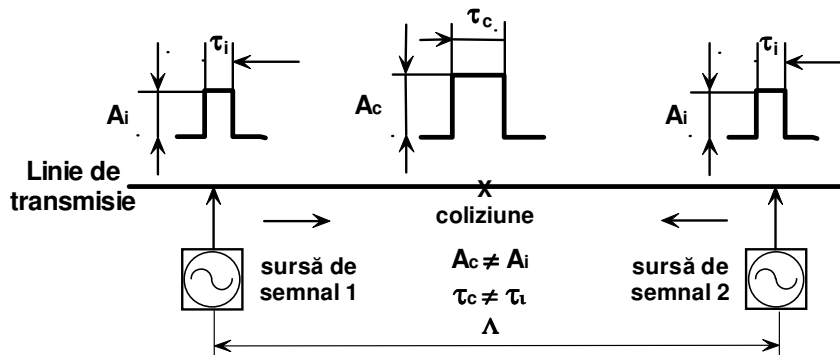


Fig. 4.9. Apariția coliziunii, în cazul transmisiilor simultane.

Să presupunem că avem o linie de transmisie la care sunt cuplate două surse de semnal aflate la distanța Λ . Timpul în care un semnal electric, transmis de una dintre acestea, străbate distanța dintre ele este:

$$t = \frac{\Lambda}{v} \quad (15)$$

Dacă cele două surse încep să transmită semnale simultan, sau într-un interval de timp mai mic decât t , are loc fenomenul de coliziune. De această problemă trebuie să se țină seama când se concep metodele de acces la mediile de transmisie comune mai multor terminale. Pentru evitarea coliziunilor, trebuie asigurat accesul neconcurent la mediu, așa cum se va putea vedea în cursul în care sunt descrise funcțiunile nivelului **OSI 2** (legătură), a cărei componentă **MAC** este responsabilă cu această problemă.

Concluzii:

- un semnal, care se propagă de-a lungul unei linii de transmisie, se comportă ca o **undă**, de **tensiune** și **curent**, care este puternic influențată de caracteristicile de **impedanță** ale liniei;
- pe parcursul traversării unei linii de transmisie, un semnal suferă o **întârziere** dependentă de caracteristicile mediului.
- **reflexia** semnalelor apare la **frontiera** dintre **două segmente** cu **impedanță caracteristică diferită**, în punctele de **înnădire**, **scurtcircuit** și de **întrerupere**;
- un semnal periodic nesinusoidal, suferă un fenomen de **dispersie**, manifestat prin **întârzierea diferită** a componentelor armonice;
- în cazul în care două sau mai multe surse transmit simultan semnale într-o linie, apare fenomenul de **coliziune**.

TESTE DE AUTOEVALUARE**I. Alegeți varianta de răspuns corectă:**

1. O linie de transmisie se comportă față de semnalele transmise, ca:
 - a) O rezistență electrică;
 - b) O inductivitate electrică;
 - c) Un cuadripol electric;
 - d) O antenă;
 - e) Un șunt.
2. Componenta reactivă este reprezentată de:
 - a) Rezistivitatea R, conductivitatea G, inductivitatea L și capacitatea C;
 - b) Inductivitatea L și capacitatea C;
 - c) Rezistivitatea R și inductivitatea L;
 - d) Rezistivitatea R și capacitatea C;
 - e) Rezistivitatea R și conductivitatea G
3. O linie de transmisie afectează semnalele de date prin următoarele fenomene:
 - a) atenuare, reflexie și coliziune;
 - b) atenuare, reflexie și dispersie;
 - c) atenuare, degradare și coliziune;
 - d) dispersie, reflexie și inducție;
 - e) atenuare, reflexie, dispersie și compensare;

II. Alegeți răspunsul corect:

1. Rezistențele „terminator” au rolul de a elimina semnalele reflectate.
☐ adevărat ☐ fals
2. Valoarea rezistenței terminator trebuie să fie mai mare sau egală decât impedanța caracteristică.
☐ adevărat ☐ fals
3. Liniile de transmisie care au aceeași impedanță caracteristică se pot conecta în paralel.
☐ adevărat ☐ fals

RĂSPUNSURI

I. Varianta de răspuns corectă:

1. c
2. b
3. b

II. Alegeți răspunsul corect:

1. adevărat
2. fals
3. fals

Bibliografie

1. **Schmitt, R.**, *Electromagnetics Explained - A Handbook for Wireless/RF, EMC, and High-Speed Electronics*, Elsevier Science, 2002