Sisteme cu microunde

Curs #4: Reflexia undelor pe liniile de transmisie fără pierderi

George Marian Vasilescu

Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea Politehnica din București

10 Mar. 2018 (rev. 14 Mar. 2019)

Cuprins

Cuprins

Comportarea liniilor de transmisie

- Liniile de transmisie sunt complet descrise de parametrii secundari $\underline{\gamma}$ și $\underline{Z}_0$.
- Aceștia depind, la rândul lor, de parametrii primari R', L', G' și C', dar și de frecvența f.

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad [\frac{1}{m}] \tag{1a}$$

$$= \alpha + j\beta$$

$$\underline{Z}_0 = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad [\Omega] \tag{1b}$$

- Dintre parametrii primari, doar doi modelează pierderile pe linie. Care sunt aceștia?

Comportarea liniilor de transmisie

- Liniile de transmisie sunt complet descrise de parametrii secundari $\underline{\gamma}$ și $\underline{Z}_0$.
- Aceștia depind, la rândul lor, de parametrii primari R', L', G' și C', dar și de frecvența f.

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad [\frac{1}{m}] \tag{1a}$$
$$= \alpha + j\beta$$
$$\underline{Z}_0 = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad [\Omega] \tag{1b}$$

- Dintre parametrii primari, doar doi modelează pierderile pe linie : R' și G'.

Linia de transmisie fără pierderi

- În anumite situații putem avea $R' << \omega L'$ și $G' << \omega C'$.
- În acest caz putem neglija pierderile și spunem că avem o **linie de transmisie fără pierderi** (LTFP).

Linia de transmisie fără pierderi

- În anumite situații putem avea $R' << \omega L'$ și $G' << \omega C'$.
- În acest caz putem neglija pierderile și spunem că avem o **linie de transmisie fără pierderi** (LTFP).
- Putem spune că $R' \approx 0$ și $G' \approx 0$, parametrii secundari (1) devenind

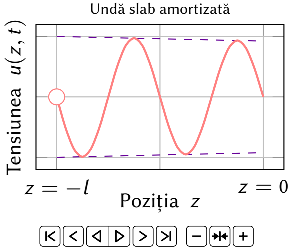
$$\underline{\gamma} = j\omega\sqrt{L'C'} \quad [\frac{1}{m}] \tag{2a}$$
$$= \alpha + j\beta$$
$$\underline{Z}_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad [\Omega] \tag{2b}$$

Când putem neglija pierderile pe o linie?

- În realitate nu există linii de transmisie ale căror pierderi sunt total inexistente.
- Însă, în unele cazuri, putem neglija pierderile.

Când putem neglija pierderile pe LT

- Le putem neglija dacă de-a lungul liniei atenuarea este suficient de mică.
- Acest lucru se poate întâmpla când linia *lungă* este suficient de scurtă încât diminuarea amplitudinii este neglijabilă.



Care sunt consecințele lipsei pierderilor pe o linie?

Putem trage câteva concluzii importante din relațiile (2).

1. **Constanta de atenuare** α este nulă

$$\boxed{\alpha = \mathrm{Re}(\underline{\gamma}) = 0\ \frac{Np}{m}} \tag{3}$$

   - Deci LTFP nu amortizează undele.
   - Aceasta vine ca o confirmare a afirmațiilor din paragrafele anterioare.

2. **Constanta de fază** β este

$$\boxed{\beta = \mathrm{Im}(\underline{\gamma}) = \omega\sqrt{L'C'}\ [\frac{1}{m}]} \tag{4}$$

Care sunt consecințele lipsei pierderilor pe o linie?

Putem trage câteva concluzii importante din relațiile (2).

3. **Impedanța caracteristică** este un număr real

$$\boxed{\underline{Z}_0 = \sqrt{L'/C'} \in \mathbb{R}}$$

4. **Viteza de fază** v_f depinde doar de parametrii L' și C', dar nu și de frecvență.

$$\boxed{v_f = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \left[\frac{m}{s}\right]} \tag{5}$$

- În cazul LT cu pierderi v_f depindea și de frecvență.
- În cazul LTFP, v_f depinde de frecvență doar dacă L' și C' depind de frecvență.

Care sunt consecințele lipsei pierderilor pe o linie?

5 Deoarece $\underline{\gamma} = j\beta$, soluțiile ecuațiilor undelor pe LTFP devin

$$\boxed{\begin{aligned} \underline{U}(z) &= \underline{U}^{+}(z) + \underline{U}^{-}(z) = \underline{U}_0^{+} e^{-j\beta z} + \underline{U}_0^{-} e^{j\beta z} && \text{(6a)} \\ \underline{I}(z) &= \underline{I}^{+}(z) + \underline{I}^{-}(z) = \frac{\underline{U}_0^{+}}{\underline{Z}_0} e^{-j\beta z} - \frac{\underline{U}_0^{-}}{\underline{Z}_0} e^{j\beta z} && \text{(6b)} \end{aligned}}$$

Cuprins

Dispersia undelor pe liniile de transmisie

- Ce importanță are dacă viteza de fază depinde de frecvență?

Dispersia undelor pe liniile de transmisie

- Ce importanță are dacă viteza de fază depinde de frecvență?
- După cum vom vedea, are o foarte mare importanță.

Dispersia undelor pe liniile de transmisie

- Ce importanță are dacă viteza de fază depinde de frecvență?
- După cum vom vedea, are o foarte mare importanță.
- Orice semnal poate fi descompus în mai multe sinusoide de *diverse* frecvențe.

Dispersia undelor pe liniile de transmisie

- Ce importanță are dacă viteza de fază depinde de frecvență?
- După cum vom vedea, are o foarte mare importanță.
- Orice semnal poate fi descompus în mai multe sinusoide de *diverse* frecvențe.
- Aceste sinusoide, aplicate la capătul liniei, dau naștere unor unde sinusoidale de *diverse* lungimi de undă ($\lambda = v_f/f$).

Dispersia undelor pe liniile de transmisie

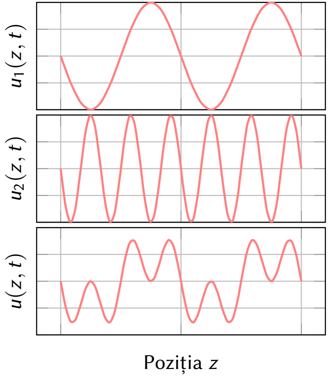
- Ce importanță are dacă viteza de fază depinde de frecvență?
- După cum vom vedea, are o foarte mare importanță.
- Orice semnal poate fi descompus în mai multe sinusoide de *diverse* frecvențe.
- Aceste sinusoide, aplicate la capătul liniei, dau naștere unor unde sinusoidale de *diverse* lungimi de undă ($\lambda = v_f/f$).

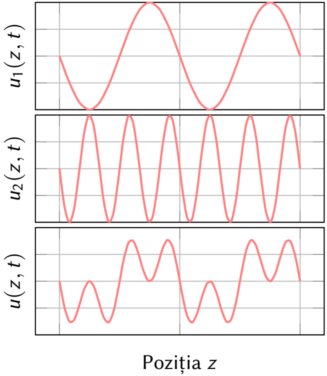
Definiție

Atunci când viteza fază v_f depinde de frecvență spunem că pe linie apare **dispersia** undelor.

Exemplu de dispersie a undelor armonice

Unda periodică $u(z,t) = u_1(z,t) + u_2(z,t)$ din figură se poate descompune în două componente u_1 și u_2 de *frecvențe diferite*.





Exemplu de dispersie a undelor armonice

Linie fără dispersie

Dacă v_f nu depinde de frecvență, atunci cele două componente se propagă cu aceeași viteză.

Linie cu dispersie

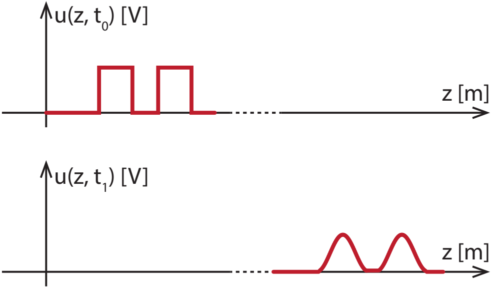
Dacă v_f depinde de frecvență, atunci cele două componente se propagă cu viteze diferite.

Concluzii

- Dacă linia are dispersie, unda se deformează și semnalul ajunge **distorsionat** la capătul liniei.
- Deci, dispersia duce la distorsionarea semnalului.
- Și undele tranzitorii sunt afectate de dispersie din aceleași motive.

Exemplu de dispersie a undelor tranzitorii

În acest exemplu se observă efectul pe care îl are dispersia asupra unui semnalul dreptunghiular.



Ce putem face pentru a elimina dispersia pe LTFP?

- Trebuie să reducem dependența vitezei de fază de frecvență.
- În cazul LTFP, aparent, $v_f = 1/\sqrt{L'/C'}$ nu depinde de frecvență.
- În realitate L' și C' pot depinde, într-o anumită măsură, de frecvență.
- Linia trebuie construită a.î. această dependență să fie cât mai redusă pe banda de frecvențe la care se lucrează.

Cuprins

Efectul sarcinii asupra undelor de pe linie

- Ce se întâmplă când **unda incidentă** pe sarcină ajunge la aceasta?

Efectul sarcinii asupra undelor de pe linie

- Ce se întâmplă când **unda incidentă** pe sarcină ajunge la aceasta?
- Avem trei cazuri distincte (ce pot fi, însă, analizate unitar):
  1. unda este complet absorbită de sarcină,
  2. unda este reflectată în totalitate de sarcină,
  3. unda este parțial reflectată și parțial absorbită de sarcină.
- Reflexia undelor va da naștere unor unde inverse. Le vom numi, în acest context, **unde reflectate**.

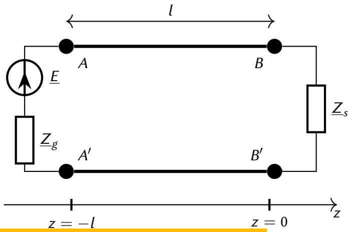
Efectul sarcinii asupra undelor de pe linie

- Ce se întâmplă când **unda incidentă** pe sarcină ajunge la aceasta?
- Avem trei cazuri distincte (ce pot fi, însă, analizate unitar):
  1. unda este complet absorbită de sarcină,
  2. unda este reflectată în totalitate de sarcină,
  3. unda este parțial reflectată și parțial absorbită de sarcină.
- Reflexia undelor va da naștere unor unde inverse. Le vom numi, în acest context, **unde reflectate**.
- Undele reflectate sunt, deci, un „ecou”.

Efectul sarcinii asupra undelor de pe linie

- Ce se întâmplă când **unda incidentă** pe sarcină ajunge la aceasta?
- Avem trei cazuri distincte (ce pot fi, însă, analizate unitar):
  1. unda este complet absorbită de sarcină,
  2. unda este reflectată în totalitate de sarcină,
  3. unda este parțial reflectată și parțial absorbită de sarcină.
- Reflexia undelor va da naștere unor unde inverse. Le vom numi, în acest context, **unde reflectate**.
- Undele reflectate sunt, deci, un „ecou”.
- De cele mai multe ori nu ne plac aceste ecouri.
- Vom vedea în cursurile următoare cum le vom elimina (sau măcar diminua).

Coeficientul de reflexie (al tensiunii)



Definiție

Coeficientul de reflexie (al tensiunii) $\underline{\Gamma}$ este raportul dintre unda complexă reflectată $\underline{U}^-(z)$ și cea incidentă $\underline{U}^+$ *în poziția în care e conectată sarcina* (la $z = 0$).

$$\boxed{\underline{\Gamma} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\underline{U}^-(z=0)}{\underline{U}^+(z=0)}} \in \mathbb{C} \tag{7}$$

$$\Longrightarrow \quad \underline{\Gamma} = \frac{\underline{U}_0^- \, e^{j\beta 0}}{\underline{U}_0^+ \, e^{-j\beta 0}} = \frac{\underline{U}_0^-}{\underline{U}_0^+}$$

$$\Longrightarrow \quad \underline{U}_0^- = \underline{\Gamma} \, \underline{U}_0^+$$

Noile expresii ale undelor

Înlocuind pe $\underline{\Gamma}$ în (6), obținem noile expresii pentru undele de tensiune și de curent:

$$\boxed{\begin{aligned} \underline{U}(z) &= \underline{U}_0^+\left(e^{-j\beta z} + \underline{\Gamma} e^{j\beta z}\right) && (8a) \\ \underline{I}(z) &= \frac{\underline{U}_0^+}{\underline{Z}_0}\left(e^{-j\beta z} + \underline{\Gamma} e^{j\beta z}\right) && (8b) \end{aligned}}$$

Am redus numărul de constante

- În relațiile (6), ce descriu undele de tensiune și curent apăreau două constante: $\underline{U}_0^+$ și $\underline{U}_0^-$.
- În noua formă (8) a mai rămas o *singură* constantă: $\underline{U}_0^+$.

Interpretarea coeficientului de reflexie

Coeficientul de reflexie este raportul a două tensiuni complexe (7).

Ce informații ne oferă $\underline{\Gamma}$?

Rezultă imediat din (7) că $\underline{\Gamma} = |\underline{\Gamma}|e^{j\theta}$ ne oferă două informații:

1. De câte ori este mai mică valoarea efectivă (și, deci, amplitudinea) undei de tensiune reflectate față de cea a celei incidente: de $|\underline{\Gamma}|$ ori.
2. Cum e defazată unda reflectată față de cea incidentă: cu θ.

Interpretarea coeficientului de reflexie

Coeficientul de reflexie este raportul a două tensiuni complexe (7).

Ce informații ne oferă $\underline{\Gamma}$?

Rezultă imediat din (7) că $\underline{\Gamma} = |\underline{\Gamma}|e^{j\theta}$ ne oferă două informații:

1. De câte ori este mai mică valoarea efectivă (și, deci, amplitudinea) undei de tensiune reflectate față de cea a celei incidente: de $|\underline{\Gamma}|$ ori.
2. Cum e defazată unda reflectată față de cea incidentă: cu θ.

Exemplu

Dacă $\underline{\Gamma} = 0,5e^{j90^\circ}$ atunci putem spune că:

1. Valoarea efectivă a undei reflectate este jumătate din cea a celei incidente,
2. Unda reflectată este defazată cu 90° în fața celei incidente (are un avans de fază de 90°).

De ce impedanțe depinde coeficientul de reflexie?

- Ne așteptăm ca $\underline{\Gamma}$ să depindă de impedanța de sarcină.
- Deoarece sarcini diferite duc la reflexii diferite.
- Știm că raportul $\underline{U}/\underline{I}$ calculat la sarcină (la $z = 0$) reprezintă impedanța complexă *din acea poziție* (care este chiar $\underline{Z}_s$).
- Ținem cont de (8) și obținem:

$$\underline{Z}_s = \frac{\underline{U}(z=0)}{\underline{I}(z=0)} = \frac{1+\underline{\Gamma}}{1-\underline{\Gamma}} \implies$$

$$\boxed{\underline{\Gamma} = \frac{\underline{Z}_s - \underline{Z}_0}{\underline{Z}_s + \underline{Z}_0}} \tag{9}$$

Dacă definim **impedanța normalizată** a sarcinii ca $\underline{z}_s = \underline{Z}_s/\underline{Z}_0$ obținem

$$\boxed{\underline{\Gamma} = \frac{\underline{z}_s - 1}{\underline{z}_s + 1}} \tag{10}$$

Câteva categorii de sarcini

- În ce situație sarcina nu reflectă deloc unda? Dar când o reflectă în totalitate?
- Deducem situațiile în care au loc scenariile anterioare fără să utilizăm încă relația (9).

Câteva categorii de sarcini

Sarcina este un element nedisipativ

- Ce se întâmplă dacă sarcina este un element nedisipativ (adică nu se „încălzește”)?
- Elementele nedisipative nu absorb putere activă pe la borne. Acestea sunt: bobina, condensatorul, golul și scurtcircuitul.

Câteva categorii de sarcini

Sarcina este un element nedisipativ

- Ce se întâmplă dacă sarcina este un element nedisipativ (adică nu se „încălzește”)?
- Elementele nedisipative nu absorb putere activă pe la borne. Acestea sunt: bobina, condensatorul, golul și scurtcircuitul.
- Deoarece nu sunt disipative, energia pe care o primesc o cedează, în totalitate, înapoi în circuit.

Câteva categorii de sarcini

Sarcina este un element nedisipativ

- Ce se întâmplă dacă sarcina este un element nedisipativ (adică nu se „încălzește”)?
- Elementele nedisipative nu absorb putere activă pe la borne. Acestea sunt: bobina, condensatorul, golul și scurtcircuitul.
- Deoarece nu sunt disipative, energia pe care o primesc o cedează, în totalitate, înapoi în circuit.
- Drept urmare amplitudinea undei reflectate va fi egală cu cea a celei incidente.
- Ne așteptăm, deci, că $|\underline{\Gamma}| = 1$. Reiese imediat din (9).

Câteva categorii de sarcini

Sarcina nu reflectă unda

- În ce situație sarcina nu reflectă deloc unda incidentă pe ea?

Câteva categorii de sarcini

Sarcina nu reflectă unda

- În ce situație sarcina nu reflectă deloc unda incidentă pe ea?
- Cât timp unda nu „sesizează” o modificare bruscă în mediul prin care se propagă aceasta nu se reflectă.
- Își „vede de drum”.

Câteva categorii de sarcini

Sarcina nu reflectă unda

- În ce situație sarcina nu reflectă deloc unda incidentă pe ea?
- Ce impedanță „vede” unda la fiecare nouă poziție la care înaintează?

Câteva categorii de sarcini

Sarcina nu reflectă unda

- În ce situație sarcina nu reflectă deloc unda incidentă pe ea?
- Ce impedanță „vede” unda la fiecare nouă poziție la care înaintează?
- Ea „vede” impedanța caracteristică $\underline{Z}_0$.

Câteva categorii de sarcini

Sarcina nu reflectă unda

- În ce situație sarcina nu reflectă deloc unda incidentă pe ea?
- Ce impedanță „vede" unda la fiecare nouă poziție la care înaintează?
- Ea „vede" impedanța caracteristică $\underline{Z}_0$.
- Apariția bruște a unei impedanțe diferită de $\underline{Z}_0$ pe line constituie o modificare bruscă a mediului de propagare.
- În acest caz unda se reflectă.

Câteva categorii de sarcini

Sarcina nu reflectă unda

- Deci, pentru elimina complet reflexiile pe LTFP impedanța de sarcină trebuie să fie egală cu impedanța caracteristică.
- Spunem că în acest caz sarcina și linia sunt **adaptate**.

Câteva categorii de sarcini

Sarcina nu reflectă unda

- Deci, pentru elimina complet reflexiile pe LTFP impedanța de sarcină trebuie să fie egală cu impedanța caracteristică.
- Spunem că în acest caz sarcina și linia sunt **adaptate**.
- În acest caz unda reflectată nu există și $|\underline{\Gamma}| = 0$. Reiese imediat din (9).
- Unul din obiectivele principale, atunci când lucrăm cu o linie, este să ne asigurăm că aceasta este adaptată la sarcină.

Câteva categorii de sarcini – concluzii

Când nu apar reflexii

- Dacă impedanța sarcinii este egală cu impedanța caracteristică a liniei $\underline{Z}_s = \underline{Z}_0$ pe linie nu apar reflexii.
- Spunem că sarcina e **adaptată** la linie.
- În cazul unei LTFP, deoarece $\underline{Z}_0 \in \mathbb{R}$, sarcina trebuie să fie un rezistor.
- În acest caz $\underline{\Gamma} = 0$.

Câteva categorii de sarcini – concluzii

Când apar reflexii totale

- Dacă sarcina este un element nedisipativ aceasta va reflecta *în totalitate* unda incidentă.
- Amplitudinea undei reflectate va fi egală cu cea a celei incidente.
- Drept urmare, $|\underline{\Gamma}| = 1$.

Cuprins

Aspectul undelor pe LTFP

- Este util să înțelegem modul în care tensiunea și curentul variază de-a lungul linei atunci când apar unde reflectate.
- Dacă pe linie există doar unda directă $u^+(z,t)$, avem aceeași variație pe care am observat-o la Cursul #2.
- Unda totală este, însă, suma undei incidente și a celei reflectate $u(z,t) = u^+(z,t) + u^-(z,t)$.

Definițe

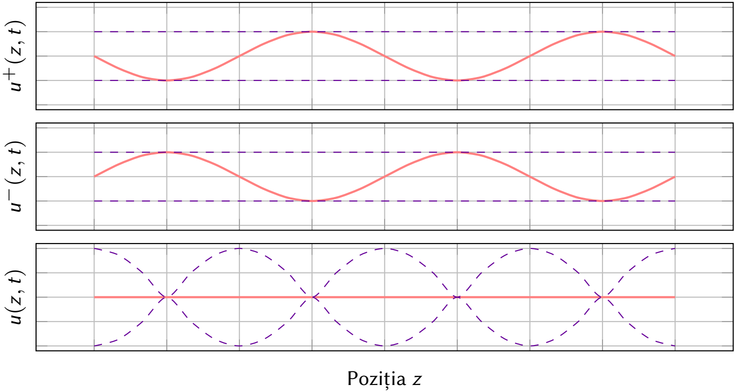
Atunci când două unde se suprapun dând naștere unei alte unde spunem că aceasta din urmă este dată de **interferența** celor două.

- Unda totală pe linie este dată de interferența undei directe și a celei inverse.

Unde staționare

- Atunci când unda reflectată și cea incidentă au aceeași amplitudine, interferența lor va da naștere unei unde staționare!
- Observăm existența unor puncte în care oscilațiile au amplitudine 0. Numim aceste puncte **noduri**.
- Punctele în care amplitudinea este maximă se numesc **ventre** (sau anti-noduri).
- Acest caz e reprezentat în animația următoare.

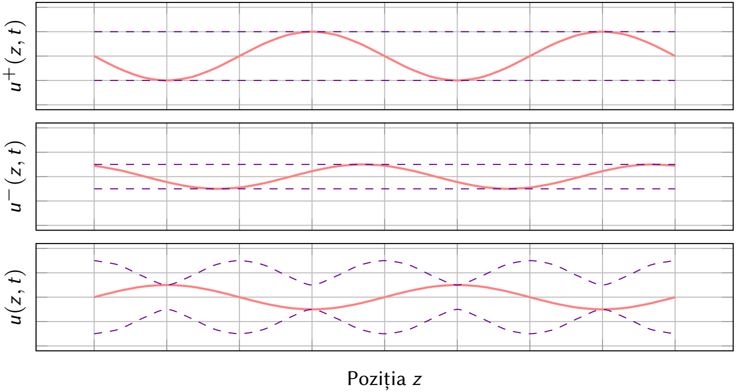
Unde staționare – animație



Unde „aproape” staționare

- De cele mai multe ori reflexiile pe linie nu sunt totale.
- Unda reflectată poate avea o amplitudine *mai mică* decât cea a celei incidente.
- În acest caz undele vor fi doar parțial staționare.
- Nu vor mai exista zone în care amplitudinea undei totale să fie zero.

Unde „aproape” staționare – animație



Variația valorilor efective ale undelor de-a lungul liniei

Concluzie

Reflexiile undelor dau naștere unor unde staționare (sau pseudo-staționare). În acest caz valoarea efectivă a tensiunii și a curentului variază *periodic* de-a lungul liniei.

Cum „simțim” variația valorilor efective?

- Ne închipuim un experiment fictiv: o furnică specială, ce nu afectează linia, se deplasează de-a lungul acesteia.
- Ea se va electrocuta din cauza tensiunii și se va încălzi din cauza curentului.
- Aceasta se electrocutează și se încălzește mai mult sau mai puțin, în funcție de poziția pe linie.

Care sunt maximele și minimele valorilor efective?

- Știm că $|\underline{U}(z)|$ e asociat valorii efective a tensiunii $u(z,t)$.
- Calculăm modulul tensiunii complexe din (8)

$$|\underline{U}(z)| = |\underline{U}_0^+| \cdot \left| e^{-j\beta z} + \underline{\Gamma} e^{j\beta z} \right| = |\underline{U}_0^+| \cdot \underbrace{\left| e^{-j\beta z} \right|}_{1} \cdot \left| 1 + \underline{\Gamma} e^{j2\beta z} \right|$$

$$= |\underline{U}_0^+| \cdot \left| 1 + \Gamma e^{j(\theta + 2\beta z)} \right| \qquad \text{unde am notat } \Gamma = |\underline{\Gamma}|$$

- $|\underline{U}(z)|$ este maxim atunci când $e^{j(\theta+2\beta z)} = 1$, deci

$$\boxed{|\underline{U}(z)|_{\max} = |\underline{U}_0^+| \cdot (1 + |\underline{\Gamma}|)} \tag{11a}$$

- $|\underline{U}(z)|$ este minim atunci când $e^{j(\theta+2\beta z)} = -1$, deci

$$\boxed{|\underline{U}(z)|_{\min} = |\underline{U}_0^+| \cdot (1 - |\underline{\Gamma}|)} \tag{11b}$$

La ce ne ajută să cunoaștem aceste maxime și minime?

- Printre altele: identificăm posibile pericole ce pot apărea pe linie.
- Furnicuța poate avea o surpriză neplăcută dacă nu e atentă la ceea ce se predă la curs.
- Ar putea crede, la prima vedere, că maximul tensiunii pe linie nu are cum să depășească tensiunea pe care o simte pe linie atunci când aceasta e adaptată.
- S-ar înșela amarnic: dacă sarcina este un element nedisipativ atunci $|\underline{\Gamma}| = 1$ și maximul valorii efective a tensiunii (11a) pe linie este *dublu* față de cea din cazul liniei adaptate!
- La fel s-ar întâmpla cu curentul: furnicuța s-ar încălzi mai mult decât s-ar aștepta în ventrele de curent.
- Ea ar realiza repede că aceste creșteri de valori se datorează undelor reflectate ce se adăuga celor incidente.

La ce ne ajută să cunoaștem aceste maxime și minime?

- Genul acesta de probleme nu sunt importante doar pentru furnicuțele fictive.
- Îi privesc și pe inginerii ce transmit puteri mari pe linii.
- Inginerii electrotehniști știu că dacă tensiunea aplicată unui izolator este prea mare, acesta se poate străpunge.
- Mai știu și că dacă aplică un curent prea mare pe un conductor acesta se poate încălzi prea tare.

Concluzia

Vrem ca amplitudinile să varieze cât mai puțin pe linie. Acest lucru se întâmplă atunci când undele reflectate sunt cât mai mici, deci când S este cât mai aproape de 1.

Raportul de undă staționară

Definiție

Raportul de undă staționară S este raportul dintre maximul și minimul valorii efective de pe lina de transmisie.

$$\boxed{S \stackrel{\text{def}}{=} \frac{|\underline{U}(z)|_{\max}}{|\underline{U}(z)|_{\min}}} = \frac{1+|\underline{\Gamma}|}{1-|\underline{\Gamma}|} \in \mathbb{R} \tag{12}$$

Observații

- Termenul folosit în limba engleză pentru S este *voltage standing wave ratio* și se abreviază cu *VSWR* sau *SWR*.
- S e un număr *real* și are valorile situate în intervalul[1] $S \in [1, \infty]$.

[1] Facem o mică abatere de la formalismul matematic și spunem că S poate avea și valoarea ∞.

Cazuri particulare

- Undele de tensiune și curent dau naștere diverselor oscilații de-a lungul liniei.
- Am văzut deja că amplitudinea poate varia periodic cu z.
- Variația amplitudinii de-a lungul liniei este dictată de amplitudinea undelor reflectate.
- Analizăm în continuare trei situații distincte:
  1. reflexiile sunt inexistente,
  2. reflexiile sunt totale,
  3. reflexiile sunt parțiale.

Caz 1: Reflexiile sunt inexistente

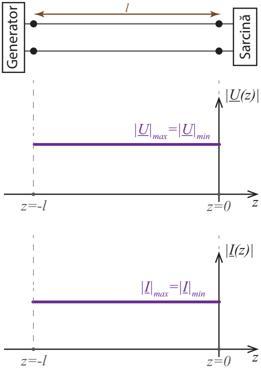
Valorile coeficienților

Are loc când sarcina e adaptată la linie.

$$\underline{\Gamma} = 0 \qquad \text{rezultă din (7)}$$

$$\underline{Z}_s = \underline{Z}_0 \qquad \text{rezultă din (9)}$$

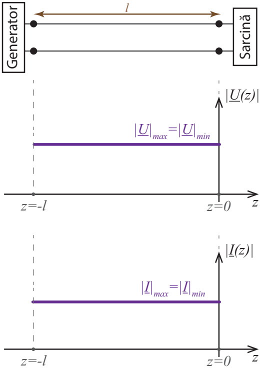
$$S = 1 \qquad \text{rezultă din (12)}$$



Caz 1: Reflexiile sunt inexistente

Variația tensiunii

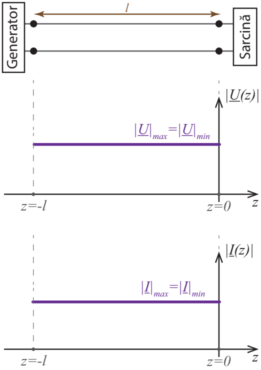
- În fiecare poziție z de pe linie, tensiunea va varia cu aceeași amplitudine.
- Deci, maximul și minimul valorii efective a tensiunii sunt egale.
- Rezultă din animații dar și din faptul că $S = 1$.
- Amplitudinea este, deci, o funcție constantă *în spațiu*.
- Cum s-ar electrocuta furnica în fiecare punct de pe linie?



Caz 1: Reflexiile sunt inexistente

Variația curentului

- Amplitudinea curentului este o funcție constantă *în spațiu.*
- Cum s-ar încălzi furnica în fiecare punct de pe linie?



Caz 2: Reflexiile sunt totale

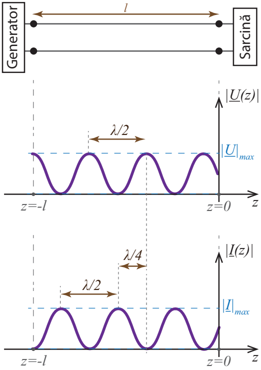
Valorile coeficienților

Are loc când sarcina e nedisipativă.

$$|\underline{\Gamma}| = 1 \qquad \text{rezultă din (7)}$$

$$\left.\begin{array}{r} \mathrm{Re}(\underline{Z}_s) = 0 \\ \text{sau } \underline{Z}_s = 0 \\ \text{sau } \underline{Z}_s = \infty \end{array}\right\} \text{rezultă din (9)}$$

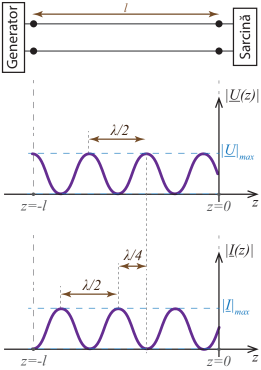
$$S = \infty \qquad \text{rezultă din (12)}$$



Caz 2: Reflexiile sunt totale

Variația tensiunii

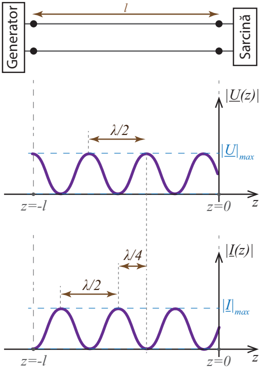
- Pe linie se stabilește o undă staționară.
- În anumite puncte (noduri) amplitudinea va fi nulă. Deci, chiar din definiția (12), poate fi dedus că $S = \infty$.
- În altele (ventre) va fi maximă.
- Amplitudinea va fi o funcție periodică *în spațiu* de perioadă $\lambda/2$.
- Cum s-ar electrocuta furnica în fiecare punct de pe linie?



Caz 2: Reflexiile sunt totale

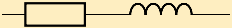
Variația curentului

- Pe linie se stabilește o undă staționară de curent.
- Amplitudinea curentului va fi o funcție periodică *în spațiu* de perioadă $\lambda/2$.
- Variația *amplitudinii* curentului este translatată cu $\lambda/4$ față de cea a tensiunii.
- Cum s-ar încălzi furnica în fiecare punct de pe linie?



Caz 3: Reflexiile sunt parțiale

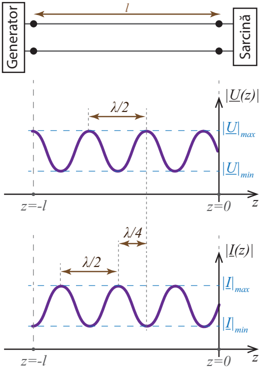
Valorile coeficienților

Este cazul cel mai general. Are loc atunci când sarcina nu este adaptată și este disipativă (de ex. ).

$|\underline{\Gamma}| \in (0, 1)$ rezultă din (7)

$$\left.\begin{array}{r} \underline{Z}_s \neq \underline{Z}_0 \\ \text{și sarcina} \\ \text{e disipativă} \end{array}\right\} \quad \text{rezultă din (9)}$$

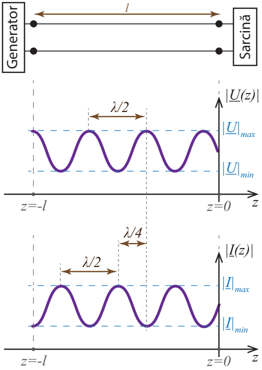
$S \in (1, \infty)$ rezultă din (12)



Caz 3: Reflexiile sunt parțiale

Variația tensiunii

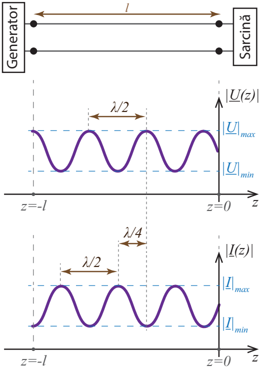
- Este cazul cel mai general.
- Pe linie se stabilește o undă parțial staționară.
- În anumite puncte amplitudinea va fi minimă, dar *diferită de zero*!
- În altele va fi maximă.
- Amplitudinea va fi o funcție periodică *în spațiu* de perioadă $\lambda/2$.
- Cum s-ar electrocuta furnica în fiecare punct de pe linie?



Caz 3: Reflexiile sunt parțiale

Variația curentului

- Pe linie se stabilește o undă staționară de curent.
- Amplitudinea curentului va fi o funcție periodică *în spațiu* de perioadă $\lambda/2$.
- Variația *amplitudinii* curentului este translatată cu $\lambda/4$ față de cea a tensiunii.
- Cum s-ar încălzi furnica în fiecare punct de pe linie?



Concluzii – reflexii

- Atunci când linia e adaptată nu apar reflexii, iar tensiunea și curentul au aceeași amplitudine în fiecare poziție z.
- Când apar unde reflectate, acestea se adaugă celor incidente ceea ce duce la variația periodică *în spațiu* a amplitudinii tensiunii și curentului.
- În acest caz, amplitudinile (și deci și valorile efective) vor avea perioada spațială de $\lambda/2$ și nu λ.
- Maximul amplitudinii curentului va fi situat în minimul amplitudinii tensiunii (și viceversa) distanța dintre acestea fiind, deci, $\lambda/4$.
- Dacă pe linie apar reflexii totale, pe ea se va stabili o undă staționară și minimul amplitudinilor va fi egal cu zero.
- În general, ne dorim ca reflexiile pe linie să fie cât mai mici, deci ca raportul de undă staționară S să fie cât mai aproape de unu.