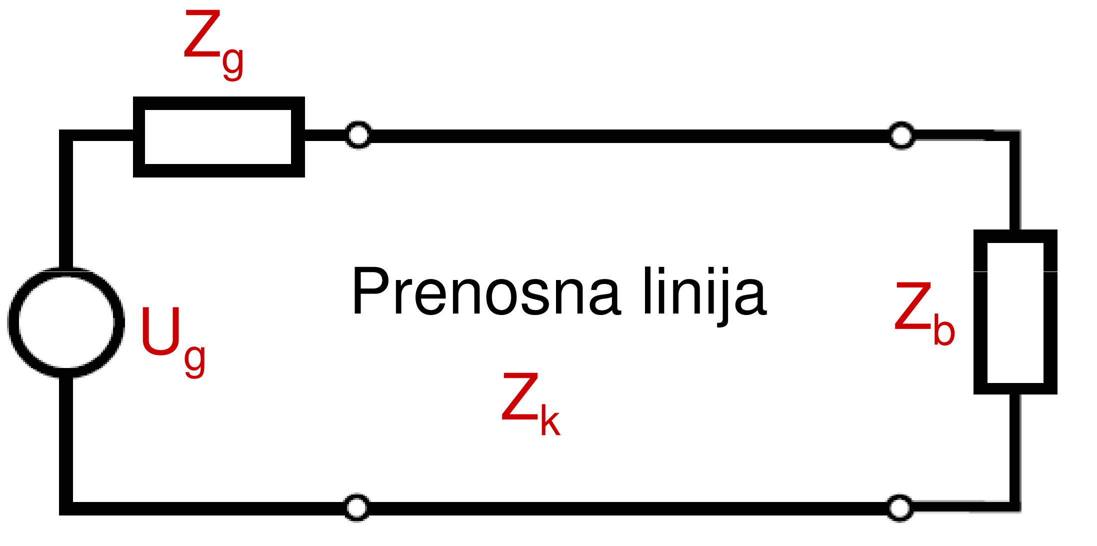
Osnove vezij s porazdeljenimi elementi



Linija je primer vezja s porazdeljenimi elementi

Mobitel d.d., izobraževanje

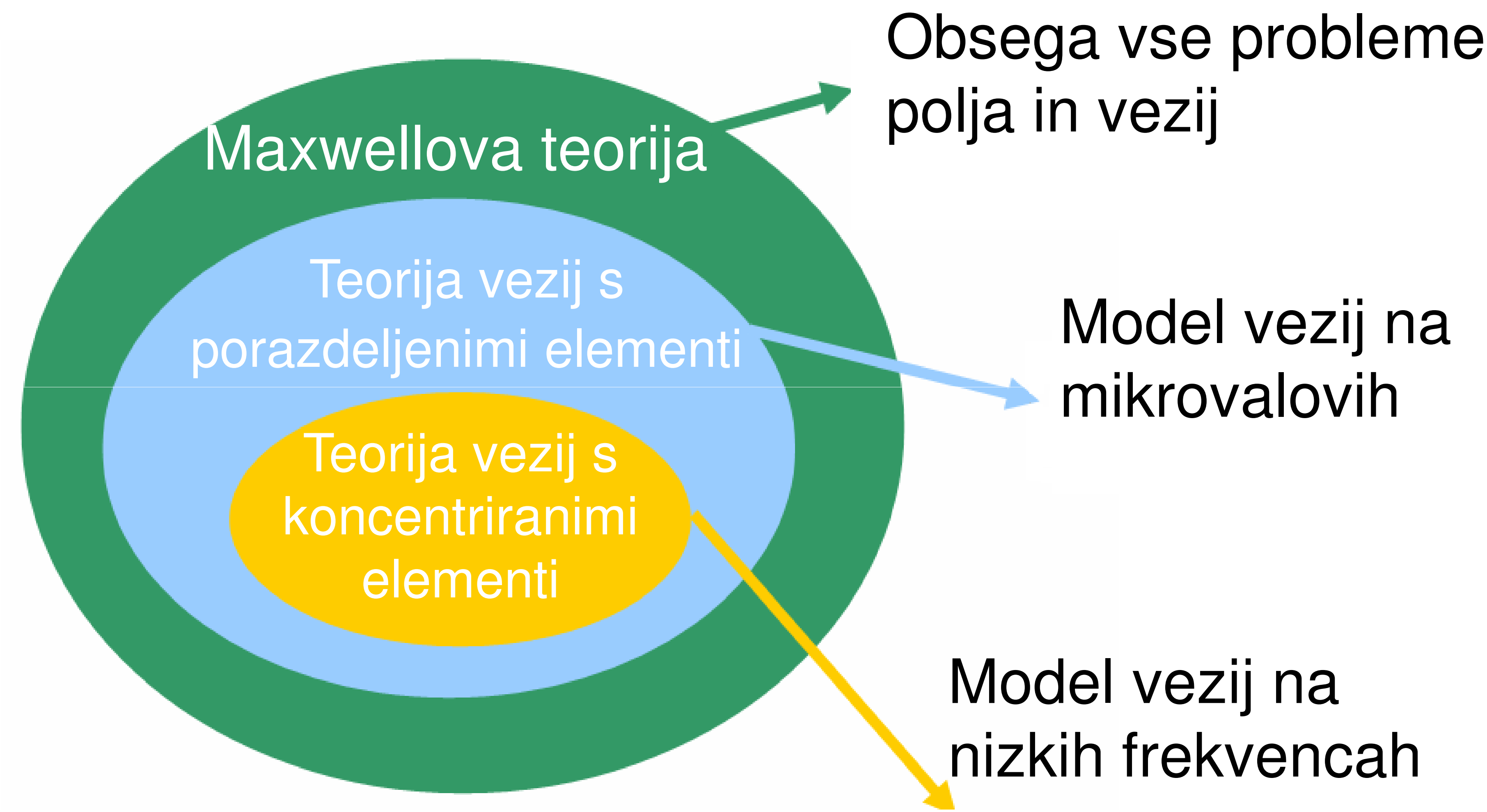
18. 9. 2009, predavanje 21

Prof. dr. Jožko Budin

Vsebina

1. Vezja s porazdeljenimi elementi
2. Teoremi (nadomestna vezava, kompenzacija, ekvivalenca, recipročnost)
3. Matrična obravnava vezij (matrika ABCD, Z, Y, H, S, T)
4. Zaporedna, vzporedna in kaskadna vezava
5. Dvovhodna, trovhodna in četverovhodna vezja
6. Lastnosti vezij (linearnost, recipročnost-nerecipročnost, brez izgub-z izgubami, notranja prilagojenost-neprilagojenost)
7. Unitarne lastnosti matrike S
8. Zveze med matrikami
9. Primeri obravnave vezij
10. Vezja iz metamaterialov ??

Hierarhija elektromagnetnih problemov



Zakonitosti električnih in magnetnih vezij izvedemo ali potrdimo z Maxwellovimi enačbami, ki obvladujejo vse probleme vezij.

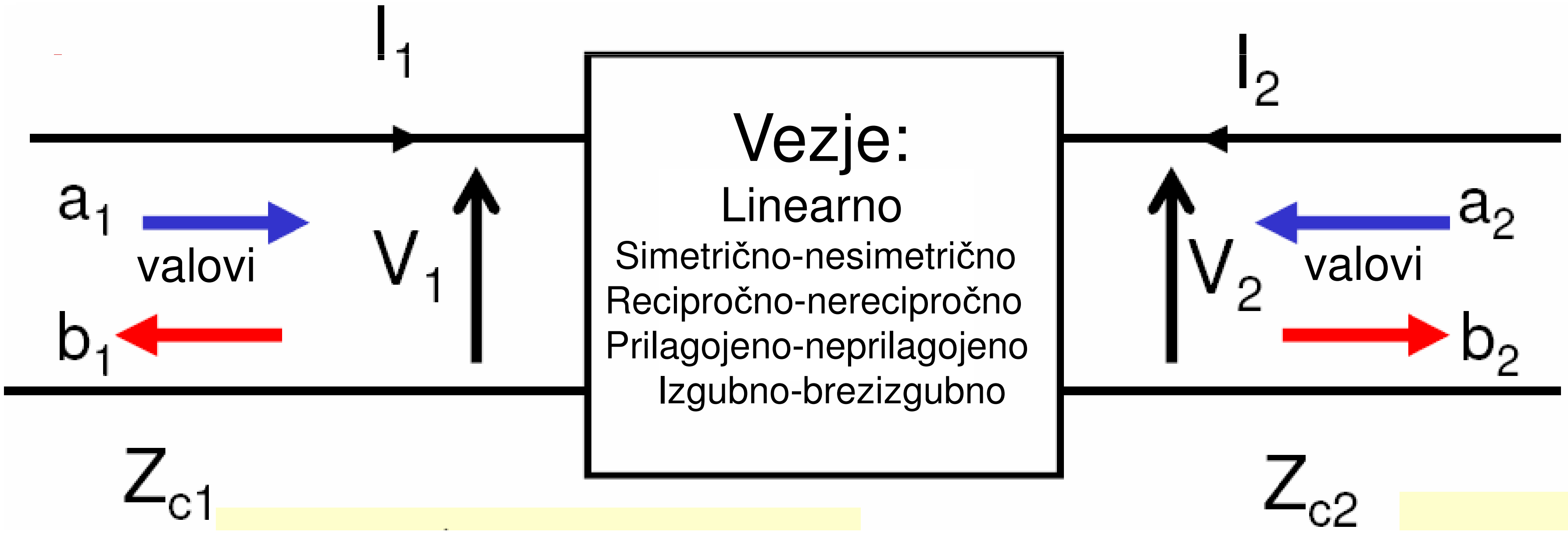
Osnove vezij s porazdeljenimi elementi

Obravnava vezij s:

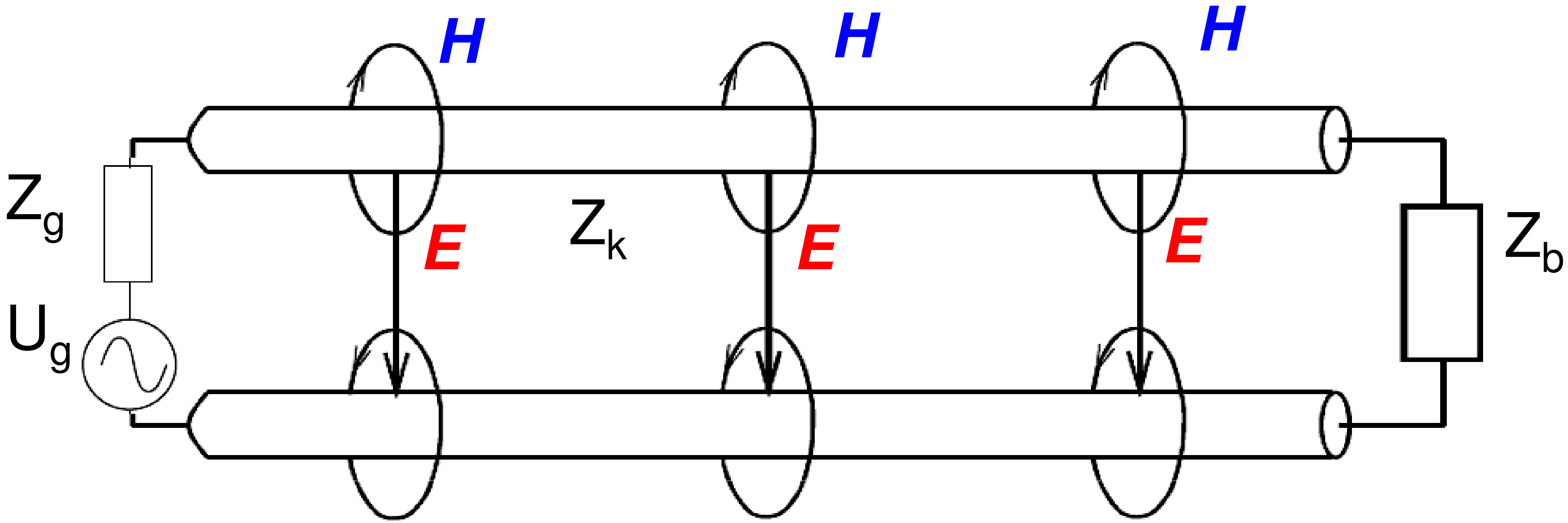
- splošnimi teoremi
- valovnimi matrikami

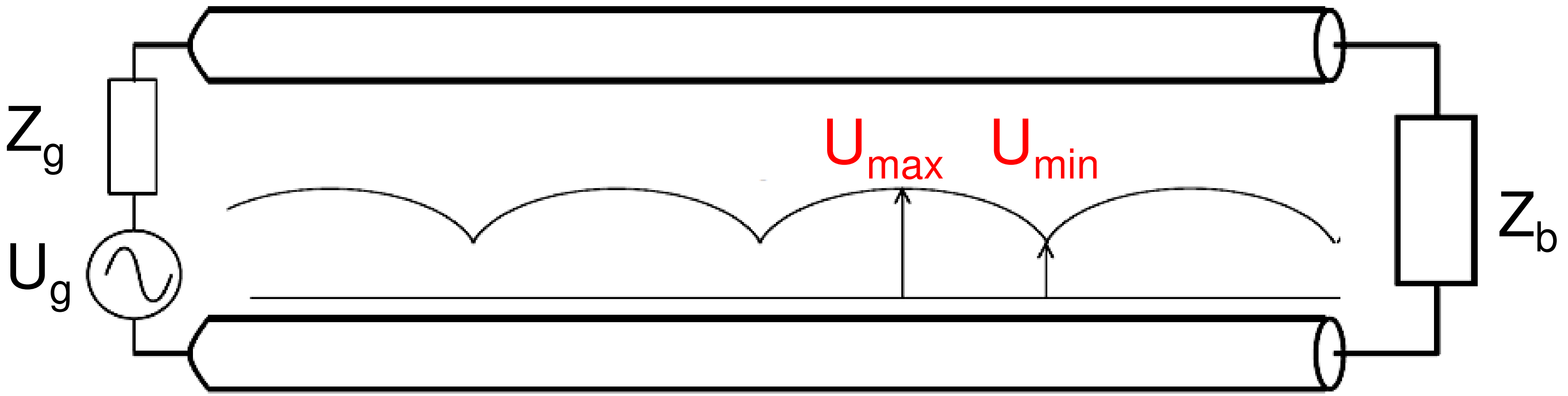
Obravnava vezij s:

- potujočimi valovi
- napetostmi in tokovi



Linija



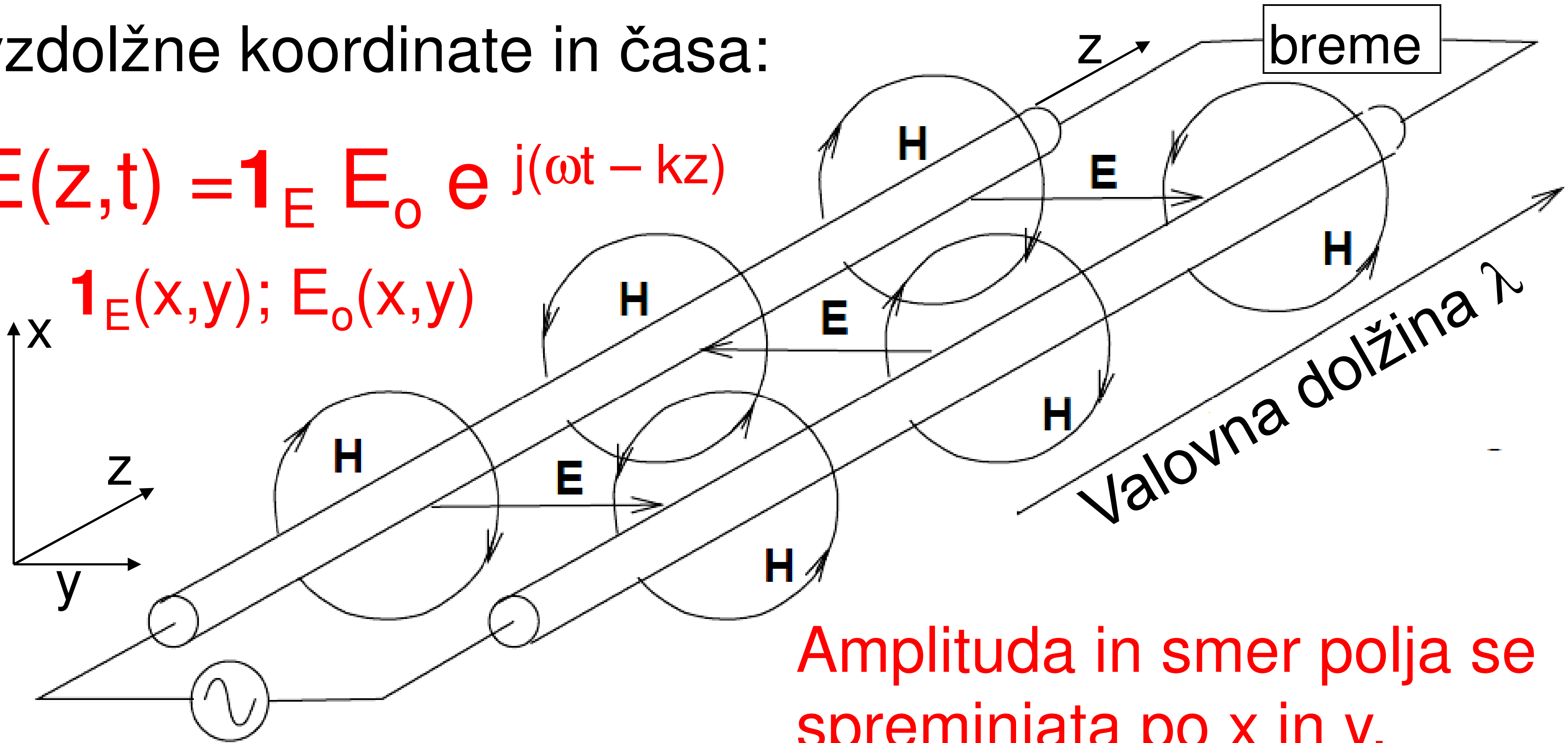


Linija

Ravninski val v odvisnosti od vzdolžne koordinate in časa:

$$\mathbf{E}(z,t) = \mathbf{1}_E E_o e^{j(\omega t - kz)}$$

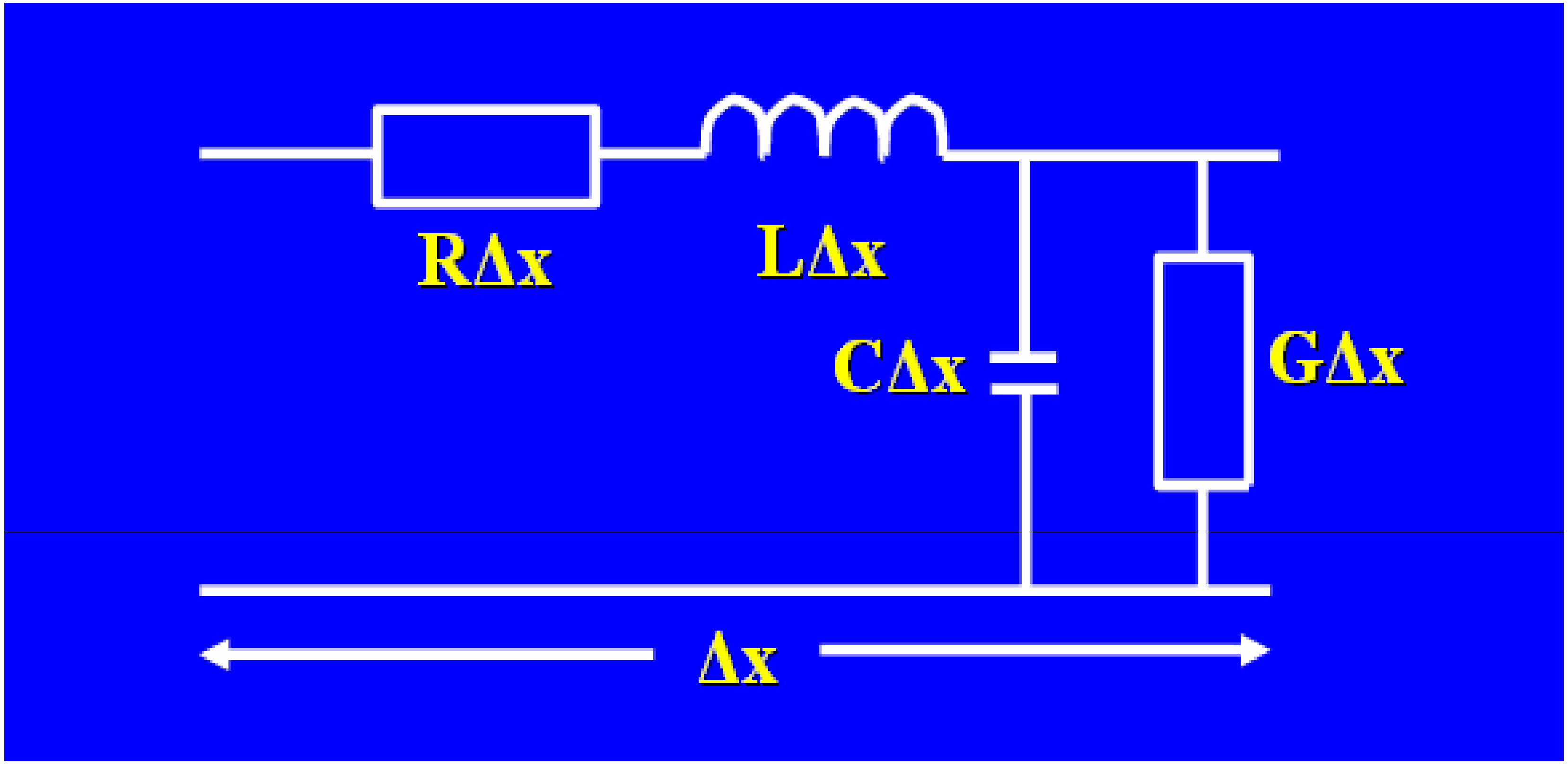
$\mathbf{1}_E(x,y)$; $E_o(x,y)$



Amplituda in smer polja se spreminjata po x in y.

Valovna dolžina λ je dolžinsko merilo spreminjanja električnega in magnetnega polja ter napetosti in toka

Vezja s porazdeljenimi elementi



Δx ... Vzdolžna elementarna dolžina vodnika s porazdeljenimi elementi ($\Delta x << \lambda$)
R ... Vzdolžna ohmska upornost na enoto dolžine v Ω/m (predstavlja izgube v kovini)
L ... Vzdolžna induktivnost na enoto dolžine v H/m
G ... Prečna prevodnost na enoto dolžine v S/m (predstavlja izgube v dielektriku)
C ... Prečna kapacitivnost na enoto dolžine v F/m
Običajno je GC >> RL.
Opomba: vezja na osnovi metamaterialov imajo zamenjano vlogo L in C.

Vezja s porazdeljenimi elementi

Porazdeljeni elementi:

- $R\Delta x$, $L\Delta x$, $C\Delta x$
- Linearni in nelinearni elementi
- Recipročni in nerecipročni elementi
- Izgubni in neizgubni elementi

Prenosni vodi:

- Dvovodniški (dvovod, koaksialni vod, (mikro)trakasti vod)
- Enovodniški (valovod, Goubojeva linija)
- Dielektrični (vlakno, planarni valovod, meja dveh dielektrikov)

Načini valovanja:

- Transverzalni: TEM, TE (H), TM (E); Hibridni: HE, EH

Pojavi in posledice:

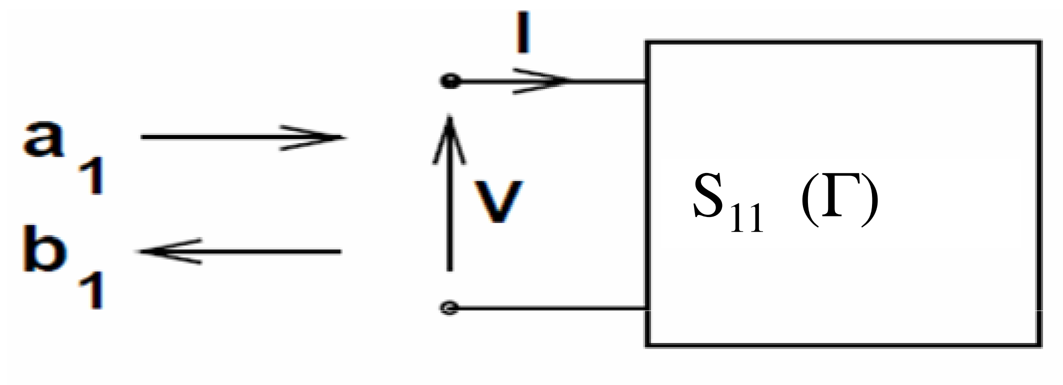
- Slabljenje (upad jakosti signala)
- Disperzija skupinske hitrosti (sprememba oblike signala)

Parametri in karakteristike linij

- R (Ω/m) ... upornost na enoto dolžine
- G (S/m) ... prevodnost na enoto dolžine
- L (H/m) ... induktivnost na enoto dolžine
- C (F/m) ... kapacitivnost na enoto dolžine
- Z_k(Ω) ... karakteristična impedanca linije
- v (m/s) ... fazna hitrost širjenja
- β(^{0}/m) ... fazna konstanta, faza na enoto dolžine
- v_g (m/s) ... skupinska (grupna) hitrost širjenja
- α(dB/km) ... konstanta slabljenja

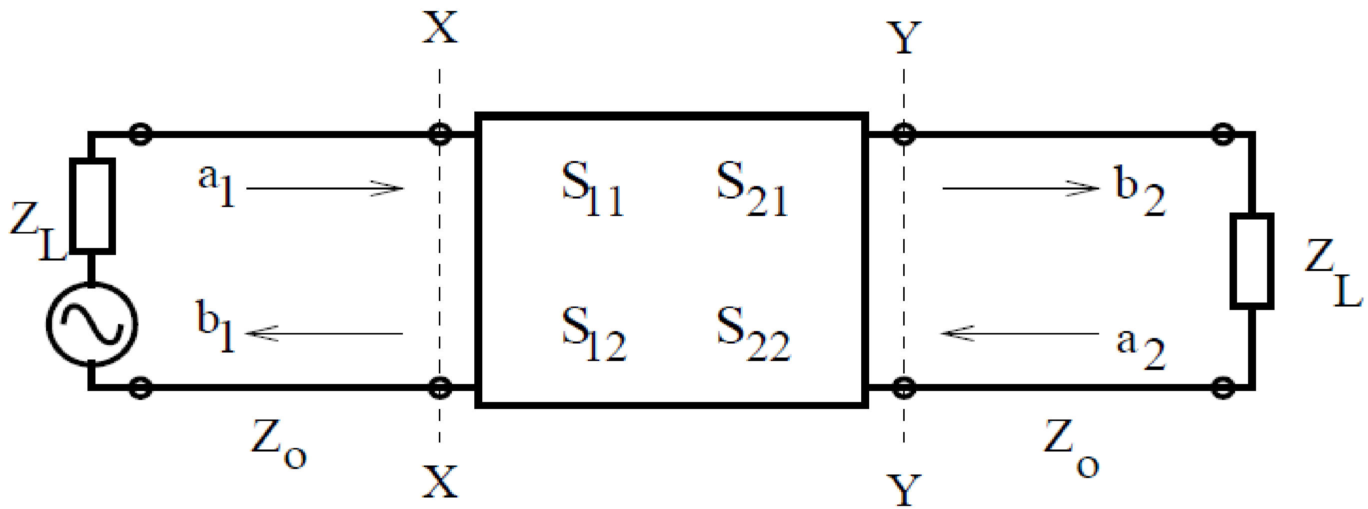
2- polna in 4- polna vezja

Enovhodno (dvopolno) vezje

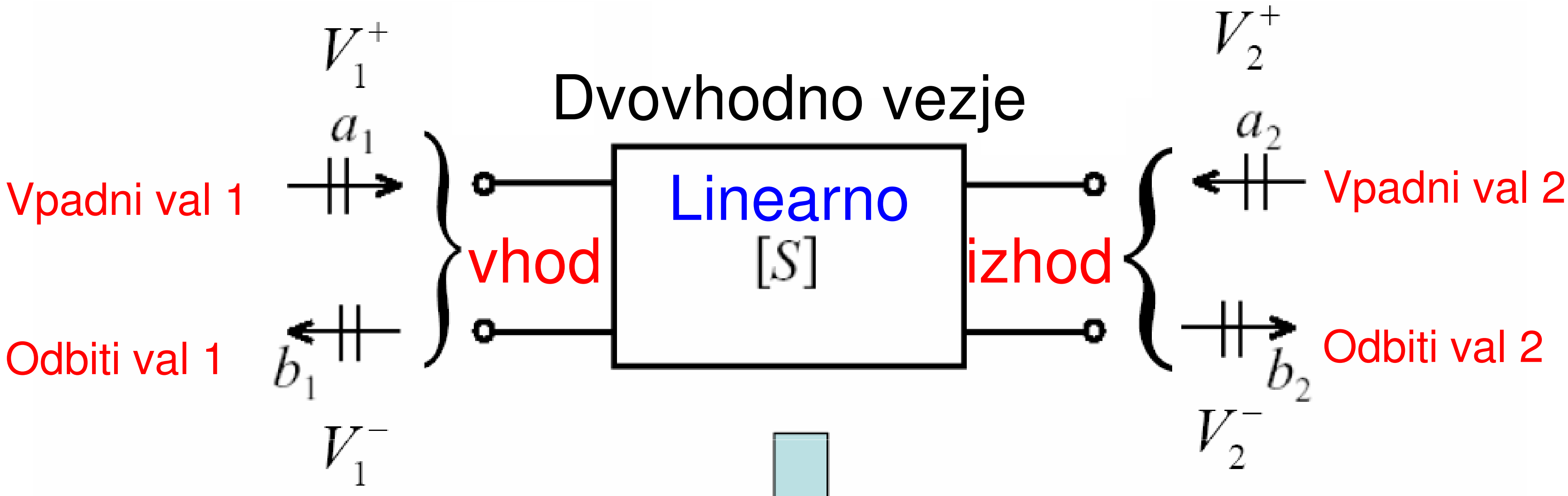


V/I = Z

Dvovhodno (četveropolno) vezje



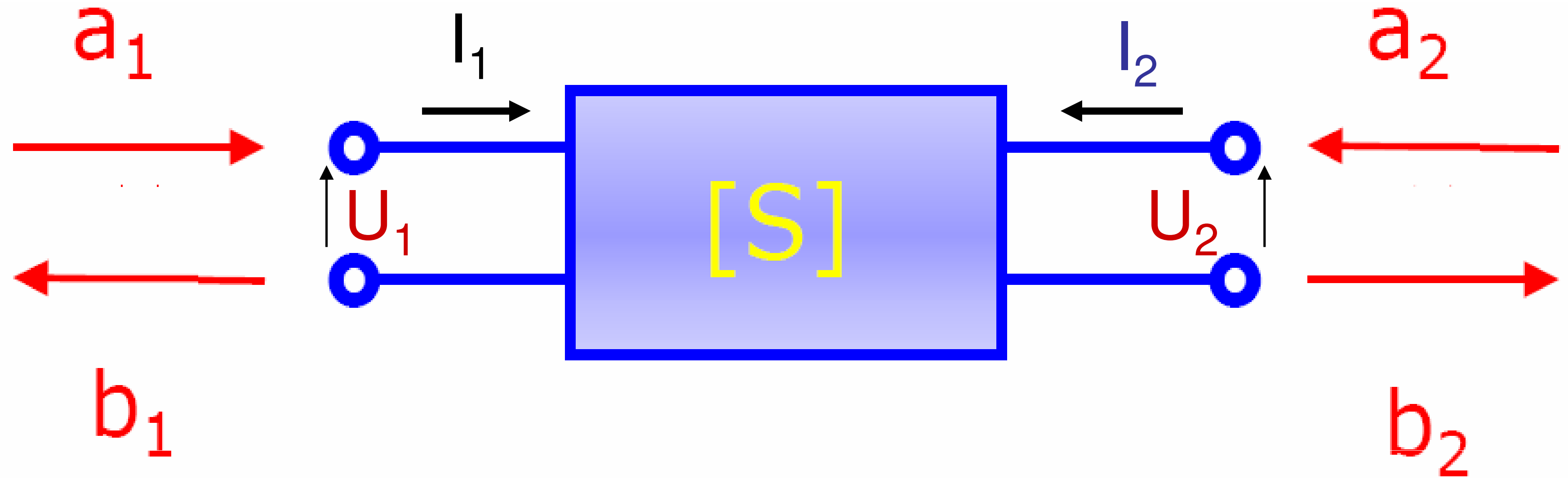
Parametri dvovhodnega vezja



Linearne enačbe: Matrične enačbe:

$$\left.\begin{aligned} V_1^- &= S_{11}V_1^+ + S_{12}V_2^+ \\ V_2^- &= S_{21}V_1^+ + S_{22}V_2^+ \end{aligned}\right\} \Rightarrow \left[\mathbf{V}^-\right] = [\mathbf{S}] \cdot \left[\mathbf{V}^+\right]$$

Dvovhodno vezje in valovi

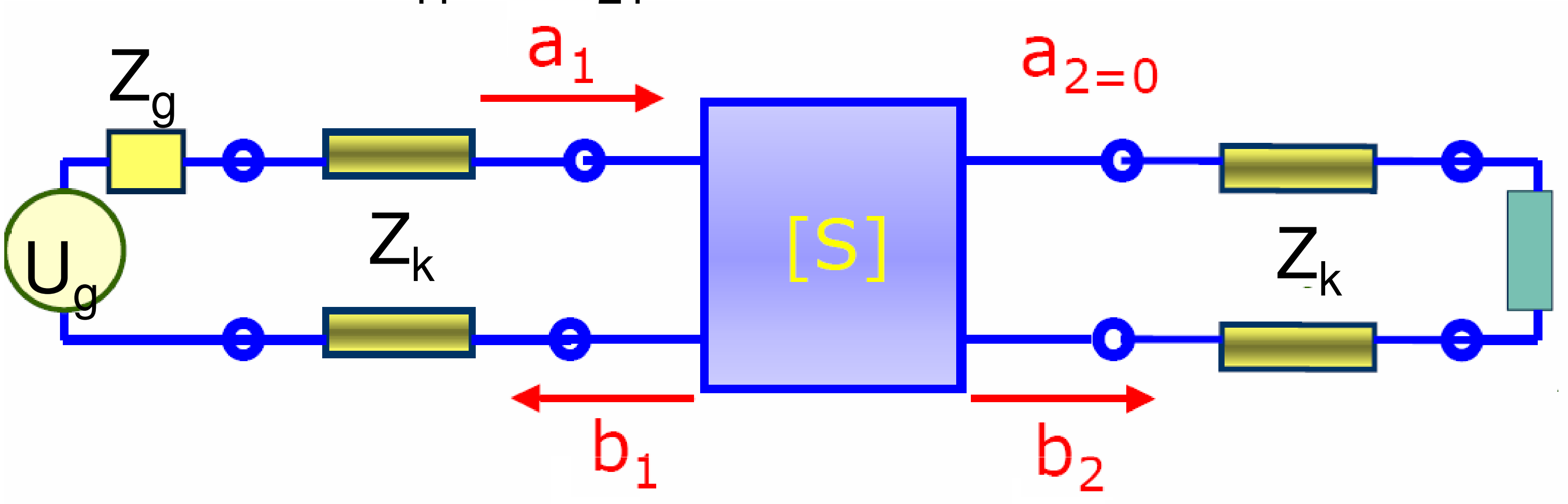


Vhodno-izhodne veličine vezja so:

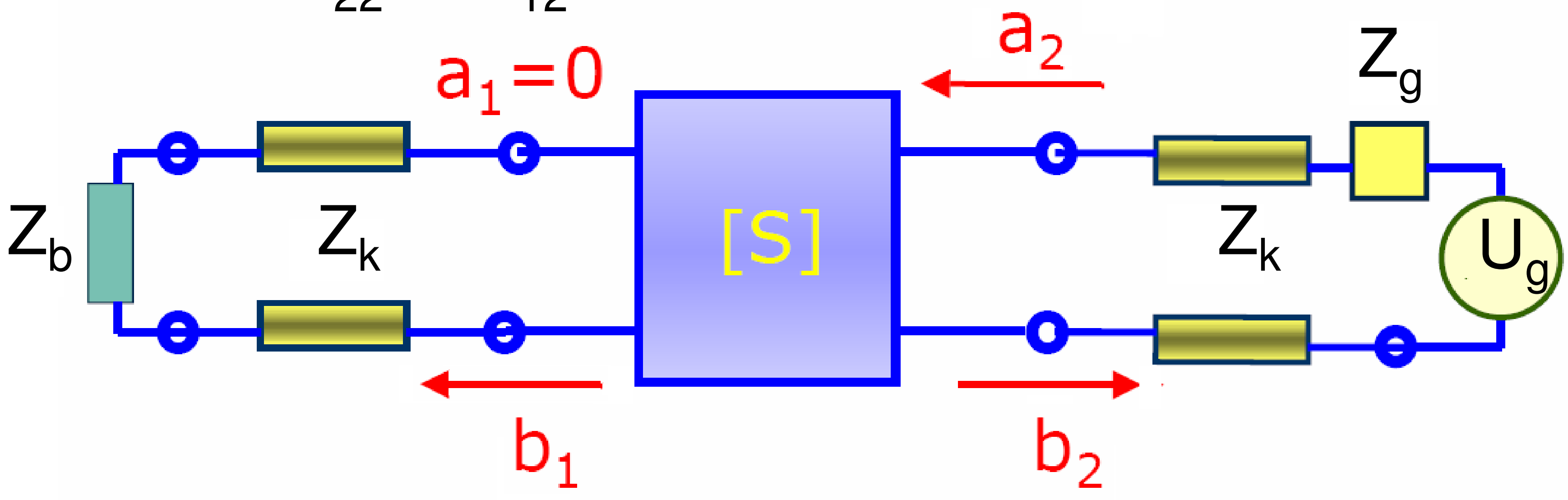
- Napetost U in tok I na vhodnih in izhodnih priključkih.
- Potujoča valova skozi vhodne in izhodne priključke:
- Vpadna valova (a_1 in a_2) skozi vhodne in izhodne priključke vstopata v vezje.
- Odbita valova (b_1 in b_2) skozi vhodne in izhodne priključke izstopata iz vezja.

Meritev vhodnih in izhodnih parametrov

- Meritev S_{11} in S_{21}:



- Meritev S_{22} in S_{12}:



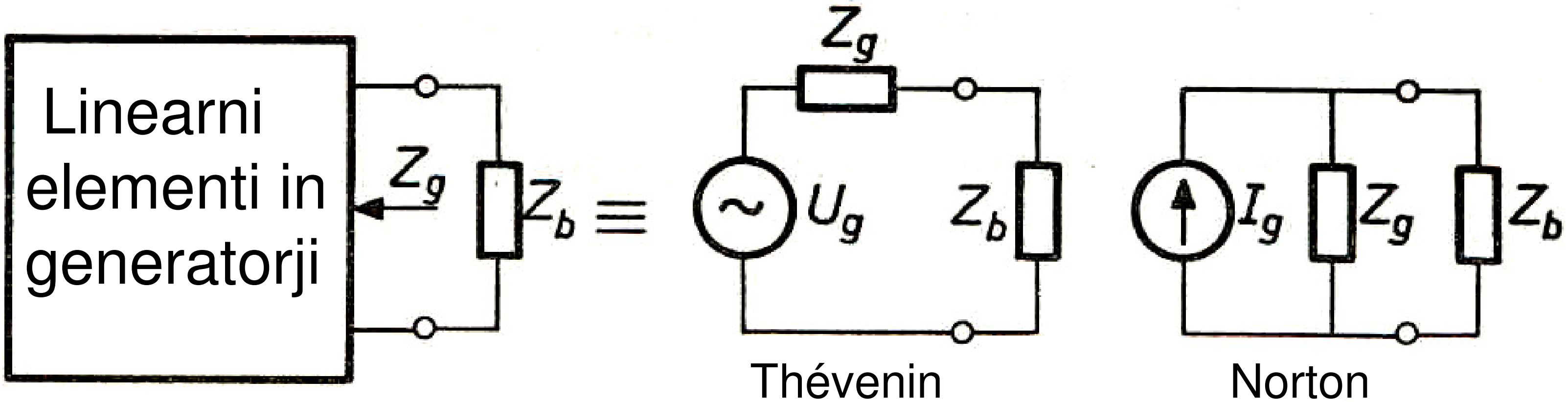
Razvrstitev vezij po lastnostih

1. Linearna vezja, pasivni elementi R, L, C
2. Nelinearna vezja, pasivni in aktivni elementi
3. Recipročna vezja, odsotnost nerecipročne snovi
4. Vezja iz koncentriranih in/ali vezja iz porazdeljenih elementov
5. Vezja brez izgub in vezja z izgubami
6. Simetrična in nesimetrična vezja
7. Dvopolna, četveropolna in osmeropolna vezja
8. Vezja na osnovi trakastih, mikrotrakastih, koaksialnih in valovodnih elementov
9. .

Thevéninov in Nortonov teorem

Dejanska vezava:

Nadomestna vezava:



Thévenin

Norton

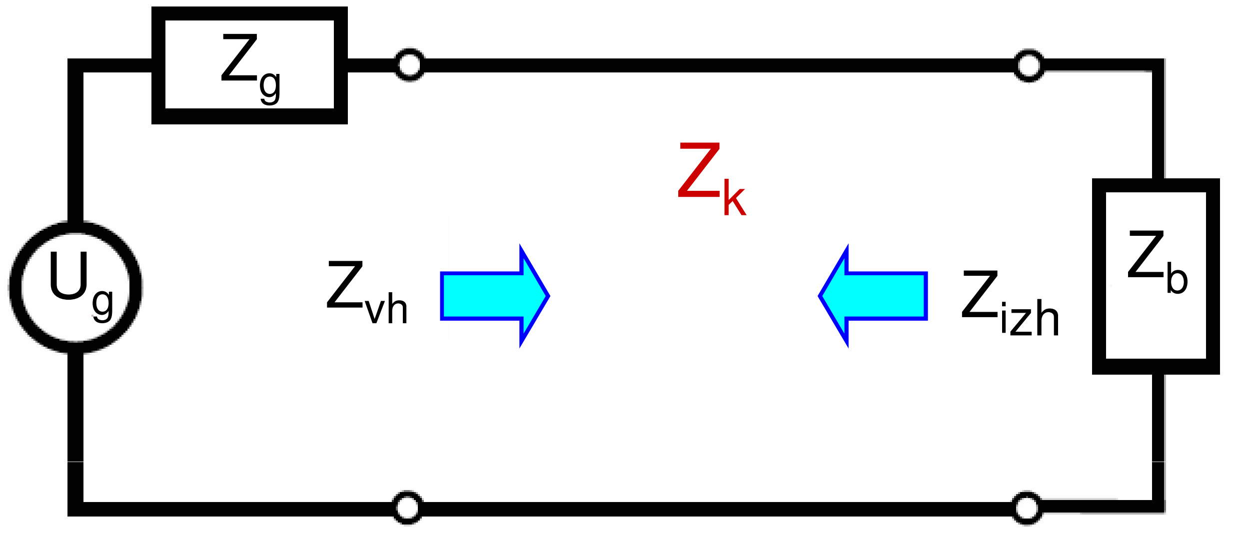
V praksi pogosto nadomeščamo kompleksna vezja s preprosto nadomestno vezavo v dveh oblikah (Théveninova in Nortonova vezava).

Z_g je notranja impedanca vezja na danih izhodnih priključkih. Računamo ali merimo jo kot vhodno impedanco vezja na teh priključkih, pri tem generatorje v vezju kratko staknemo oz. nadomestimo z notranjimi impedancami.

U_g in I_g sta napetost na odprtih priključkih vezja in tok na kratkostaknjenih priključkih vezja.

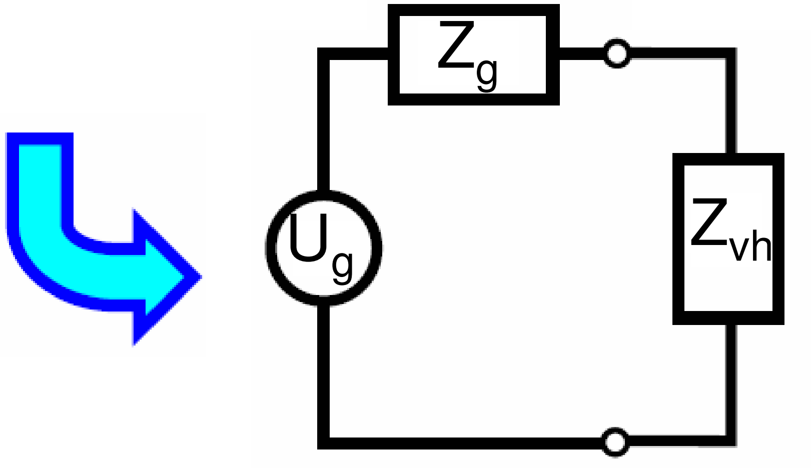
Nadomestna vezava linije

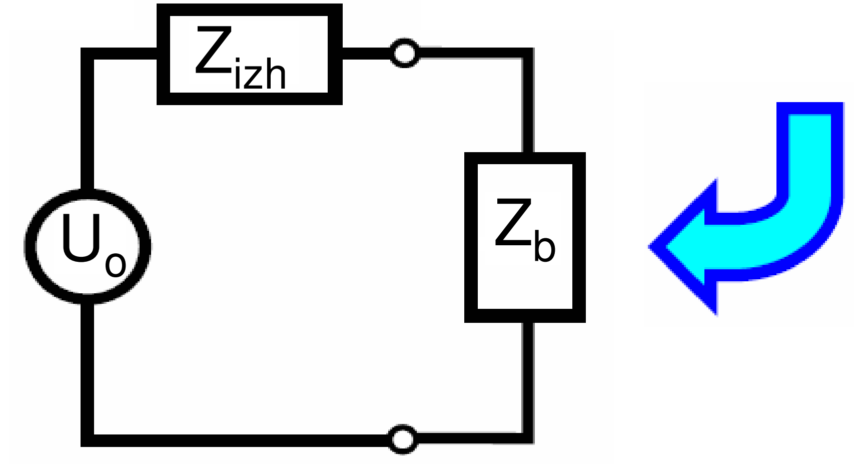
- Vezja iz porazdeljenih elementov



Generator z bremenom Z_{vh}:

Thévéninov generator:



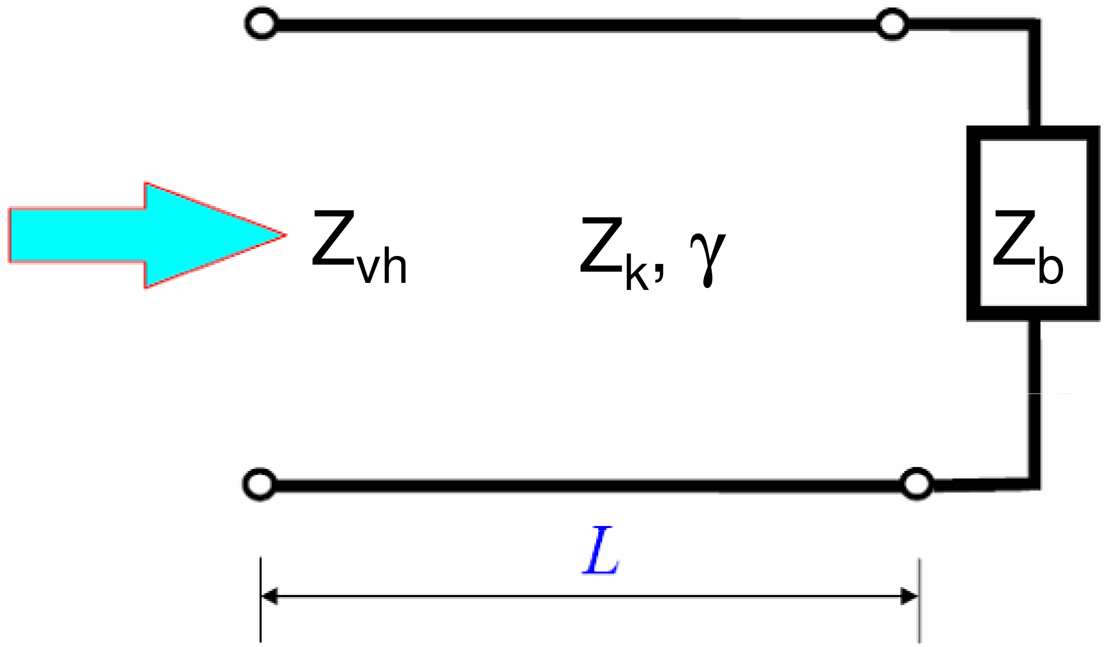


Oblike nadomestne vezave

1. V nadomestni vezavi ohranimo generator; linijo, obremenjeno z impedanco Z_b, pa nadomestimo z njeno vhodno impedanco na začetku linije (na sliki).
2. V nadomestni vezavi po Thėveninu uvedemo nadomestni generator z napetostjo, ki je enaka napetosti na odprtem koncu linije in notranjo impedanco, ki je enaka vhodni impedanci na koncu linije, obremenjene z impedanco generatorja Z_g.
3. V splošni nadomestni vezavi pretrgamo linijo kjer koli na njeni dolžini. Nadomestni generator ima napetost na odprtem izhodu iz levega dela linije in notranjo impedanco, ki je vhodna impedanca levega dela linije, obremenjene z impedanco generatorja Z_g. Nadomestno breme je enako vhodni impedanci desnega dela z Z_b obremenjene linije.
4. Prenos moči po liniji je največji in enak $|U_g|^2/8R_g$, ko je vhodna impedanca linije z ene strani enaka konjugirani vrednosti vhodne impedance z druge strani ($Z_{leva} = Z_{desna}^*$).

Vhodna impedanca linije

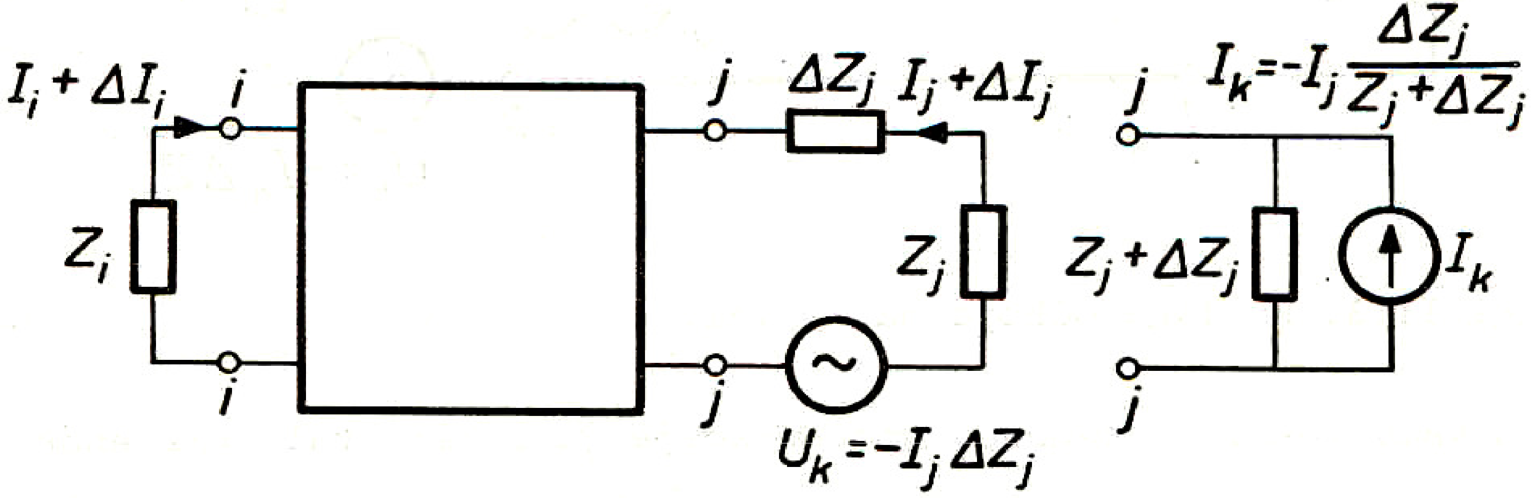
$Z_{vh} = f\ (\omega, Z_k, \gamma, L)$



Vhodna impedanca linije brez izgub je enaka impedanci bremena, če je dolžina linije $L = n\ \lambda/2$, kjer je n celo št.

Teorem kompenzacije

Kompenzacijski generator:

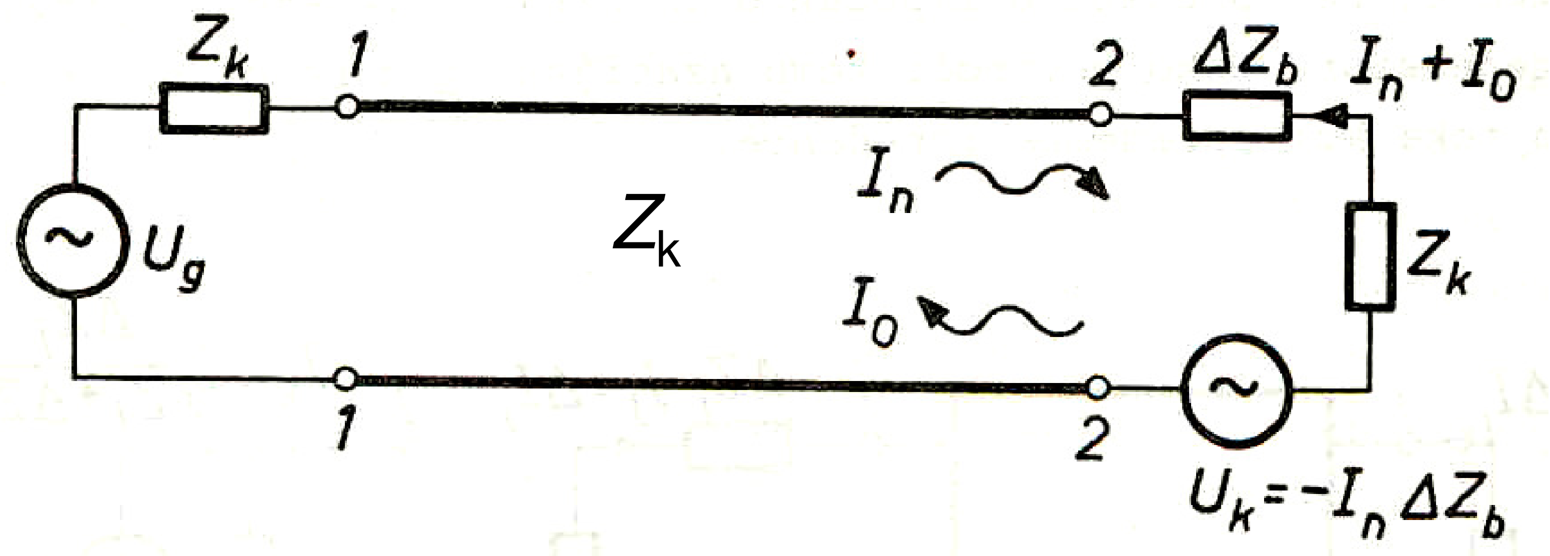


Thevenin Norton

Sprememba impedance v j-ti veji vezja z vrednosti Z_j na vrednost $Z_j + \Delta Z_j$ povzroči v splošnem spremembo toka v drugih vejah vezja. Spremembo toka ΔI_i v i-ti veji vezja vzbudi navidezno kompenzacijski generator napetosti $U_k = -I_j \Delta Z_k$ v zaporedju s spremenjeno impedanco $Z_j + \Delta Z_j$. Alternativna oblika kompenzacijskega generatorja toka v obliki Nortonove nadomestne vezave je prikazana na sliki.

Teorem kompenzacije uporabljamo, ko nas zanima učinek, ki ga povzroči neka sprememba v vezju.

Kompenzacijski generator in odboj od konca linije



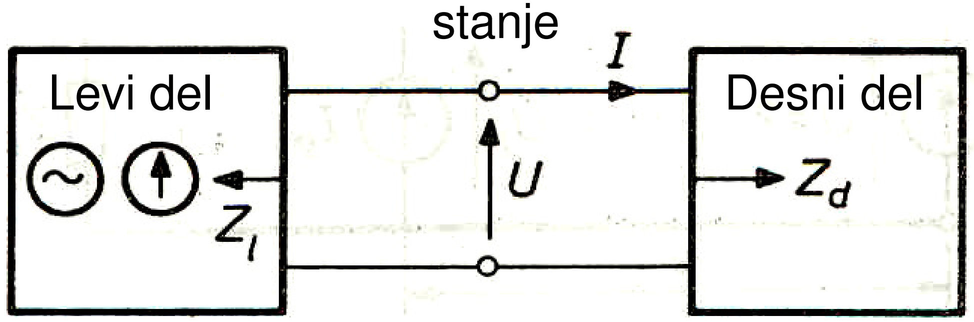
Ko je linija zaključena z bremenom, čigar impedanca je enaka karakteristični impedanci linije Z_k, je razmerje razmerje med napetostjo in tokom na bremenu enako Z_k. Razmerje med napetostjo in tokom vpanega vala je po definiciji enako Z_k. Vpadni val v tem primeru ne povzroči na koncu linije nobene spremembe.

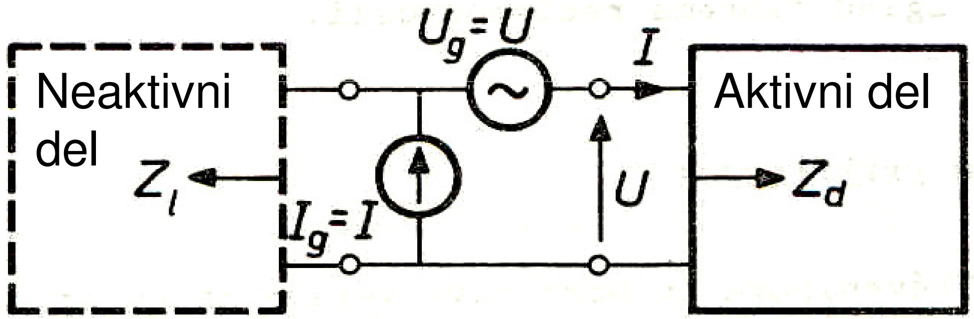
Če zaključno impedanco spremenimo z vrednosti Z_k na vrednost $Z_b = Z_k + \Delta Z_b$, kjer je $\Delta Z_b = Z_b – Z_k$, se pojavi odbiti val toka I_o, ki ga navidezno vzbuja kompenzacijski generator napetosti $U_k = - I_n \Delta Z_b$.

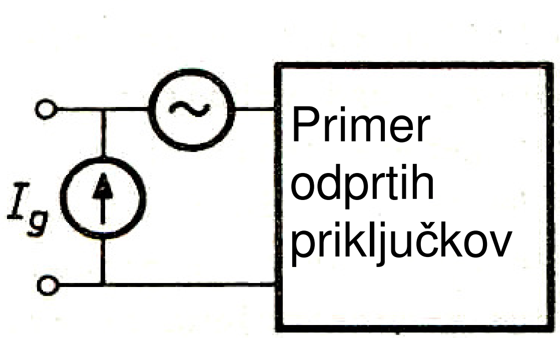
Odbiti val toka je $\mathbf{I_o} = U_k/(Z_b + Z_k) = -I_n(Z_b – Z_k)/(Z_b + Z_k) = \mathbf{- I_n}\Gamma$ (v skladu z definicijo odbojnosti)

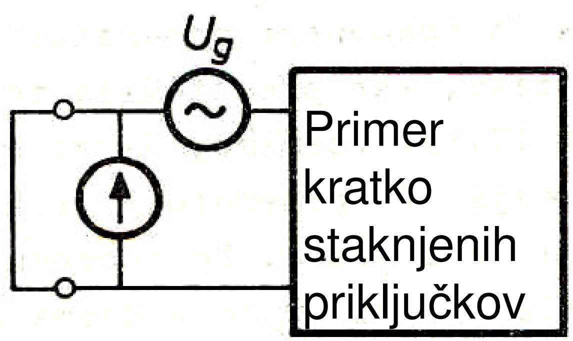
Teorem ekvivalence za linijo

- Na določenih prikjučkih vezja ali prenosne linije določimo ekvivalentne vire tako, da vzbujajo tok in napetost (v spošnem polje) le v enem (na sliki desnem) delu.
- To je različica Huygensovega principa, ki se uporablja v optiki in radijski propagaciji.
- Usmerjeno vzbujanje dosežemo z dvema generatorjema, napetostnim in tokovnim. Razmerje $U_g/I_g = Z_d$
- Ker je vezje v smeri proti levi neaktivno, ga v skrajnem primeru lahko kratko staknemo ali odpremo. Pomeni, da je v enem primeru aktiven le napetostni, v drugem le tokovni generator.

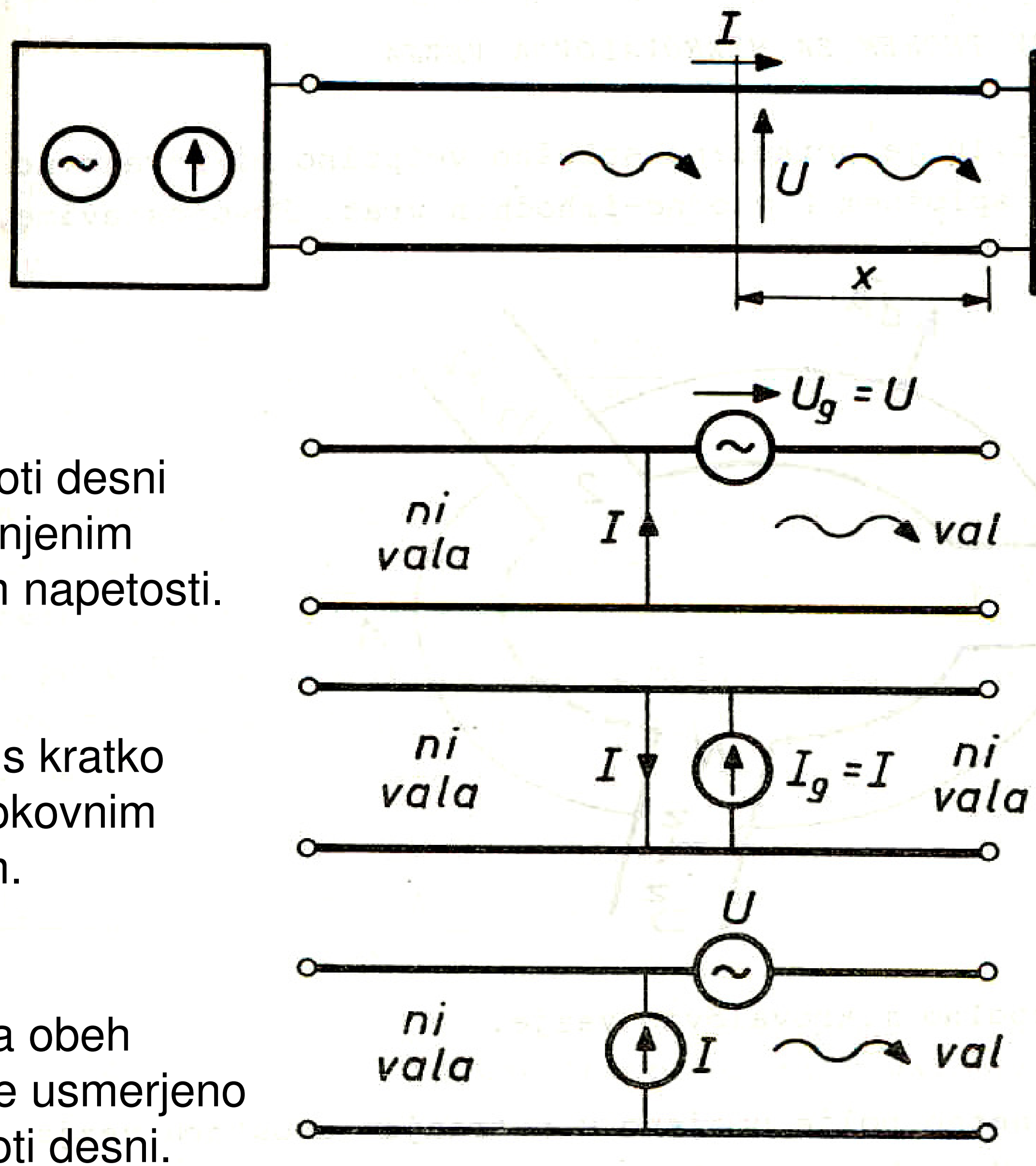








Usmerjeno vzbujanje linije



Vzbujanje proti desni s kratko staknjenim generatorjem napetosti.

vzbujanje proti desni

Ni vzbujanja s kratko staknjenim tokovnim generatorjem.

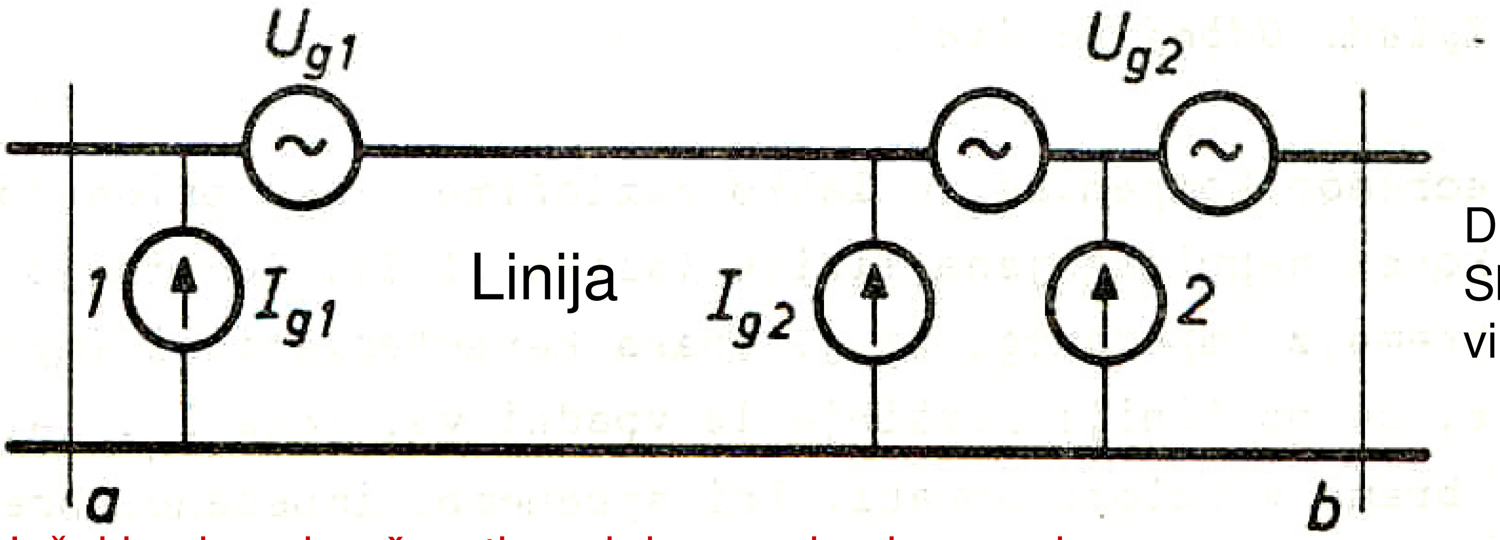
ni vzbujanja

Superpozicija obeh primerov daje usmerjeno vzbujanje proti desni.

vzbujanje proti desni

Splošni teorem recipročnosti

Prva skupina virov



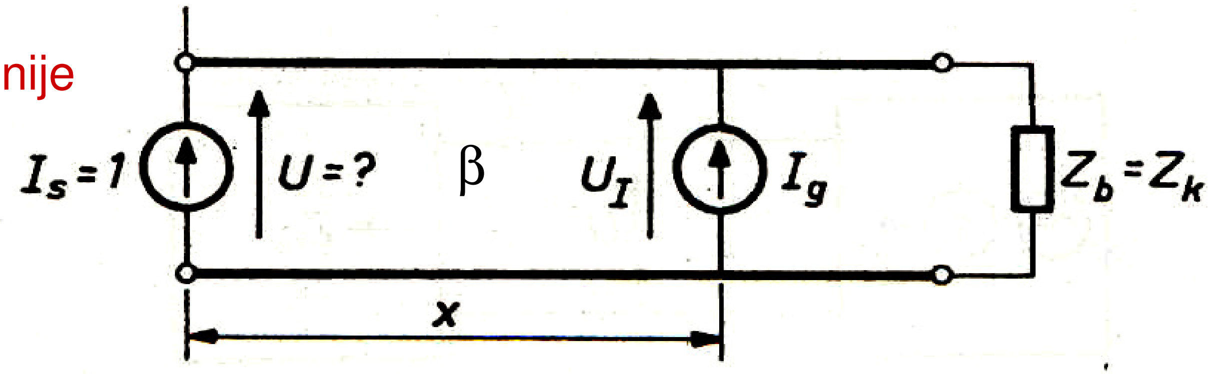
Druga Skupina virov

Splošni izrek recipročnosti med dvema skupinama virov:

$$\sum (I_{g1}U_2 - U_{g1}I_2) = \sum (I_{g2}U_1 - U_{g2}I_1)$$

Zgled: Napetost U na začetku linije

$$U = I_g U_I / I_s = I_g\, Z_k\, e^{-j\beta x}$$



Superpozicija v linearnih vezjih

Koherentni signal:

- Sinusni signal, ozkopasovni signal, moduliran signal
- Seštevajo se trenutne vrednosti napetosti ali toka

$u(t) = u_1(t) + u_2(t);$ $(p(t) >/= p_1(t) + p_2(t)).$

Nekoherentni signal:

- Širokopasovni šum
- Seštevajo se trenutne vrednosti napetosti ali toka in hkrati povprečje kvadratov (moč)

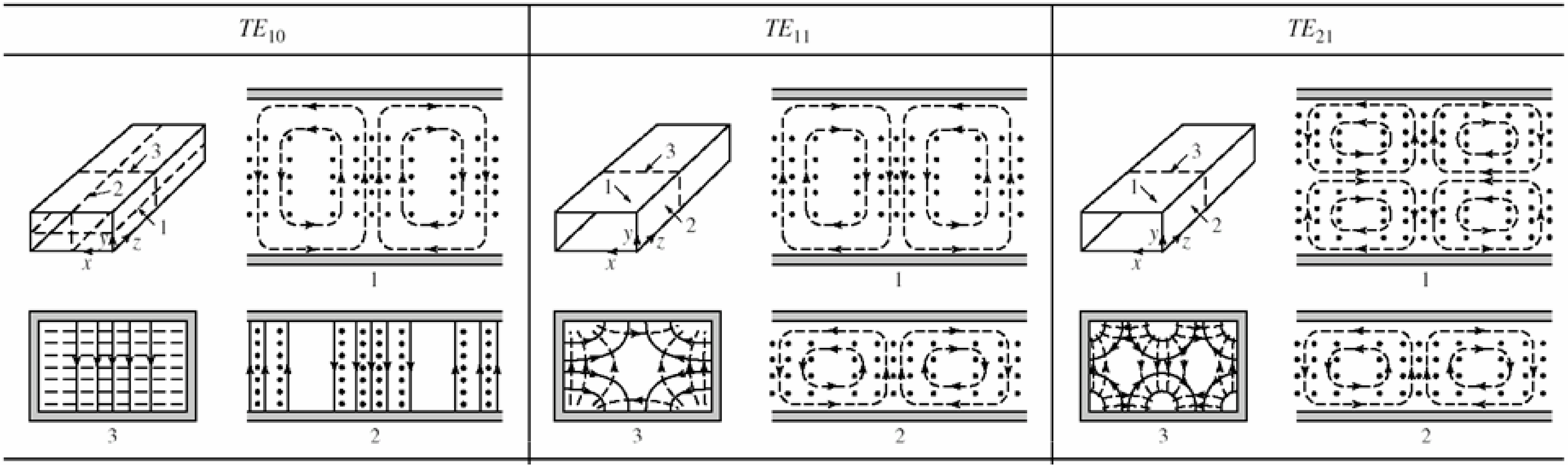
$u(t) = u_1(t) + u_2(t);$ $p(t) = p_1(t) + p_2(t).$

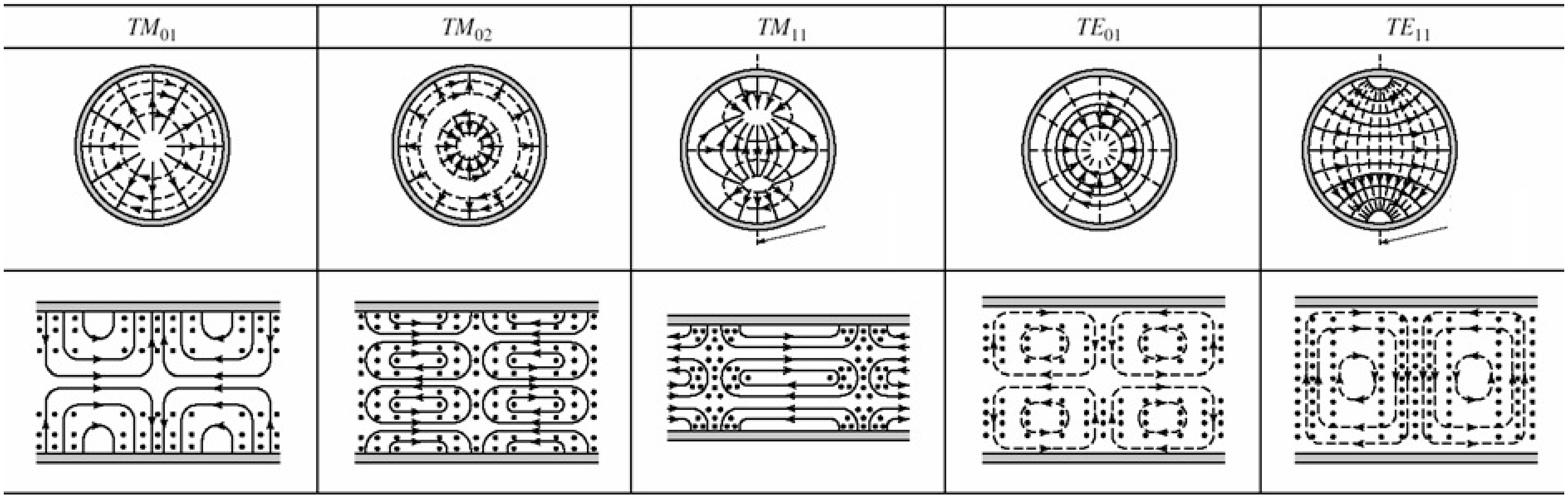
Valovni načini (rodovi)

- TEM, (E_z=H_z=0) - Električno in magnetno polje imata prečni komponenti pravokotni na smer razširjanja valovanja.
- TE (H), (E_z=0) – Električno polje ima le prečno komponento, magnetno polje pa tudi vzdolžno komponento
- TM (E), (H_z=0) - Magnetno polje ima le prečno komponento, električno polje pa tudi vzdolžno komponento
- HE – Električno in magnetno polje imata prečno in vzdolžno komponento, prevladuje H
- EH - Električno in magnetno polje imata prečno in vzdolžno komponento, prevladuje E
- Ortogonalnost med rodovi: Integral po prečnem prerezu A zmnožka polj rodov m in n je nič, moči rodov pa se seštevata:

$$\int_S (E_m \times H_n^*) \cdot z \, dS = 0 \qquad P_z = P_z^{(m)} + P_z^{(n)}$$

Valovod pravokotnega in krožnega prereza





Vrste mikrovalovnih vezij

Po številu vhodov – izhodov:

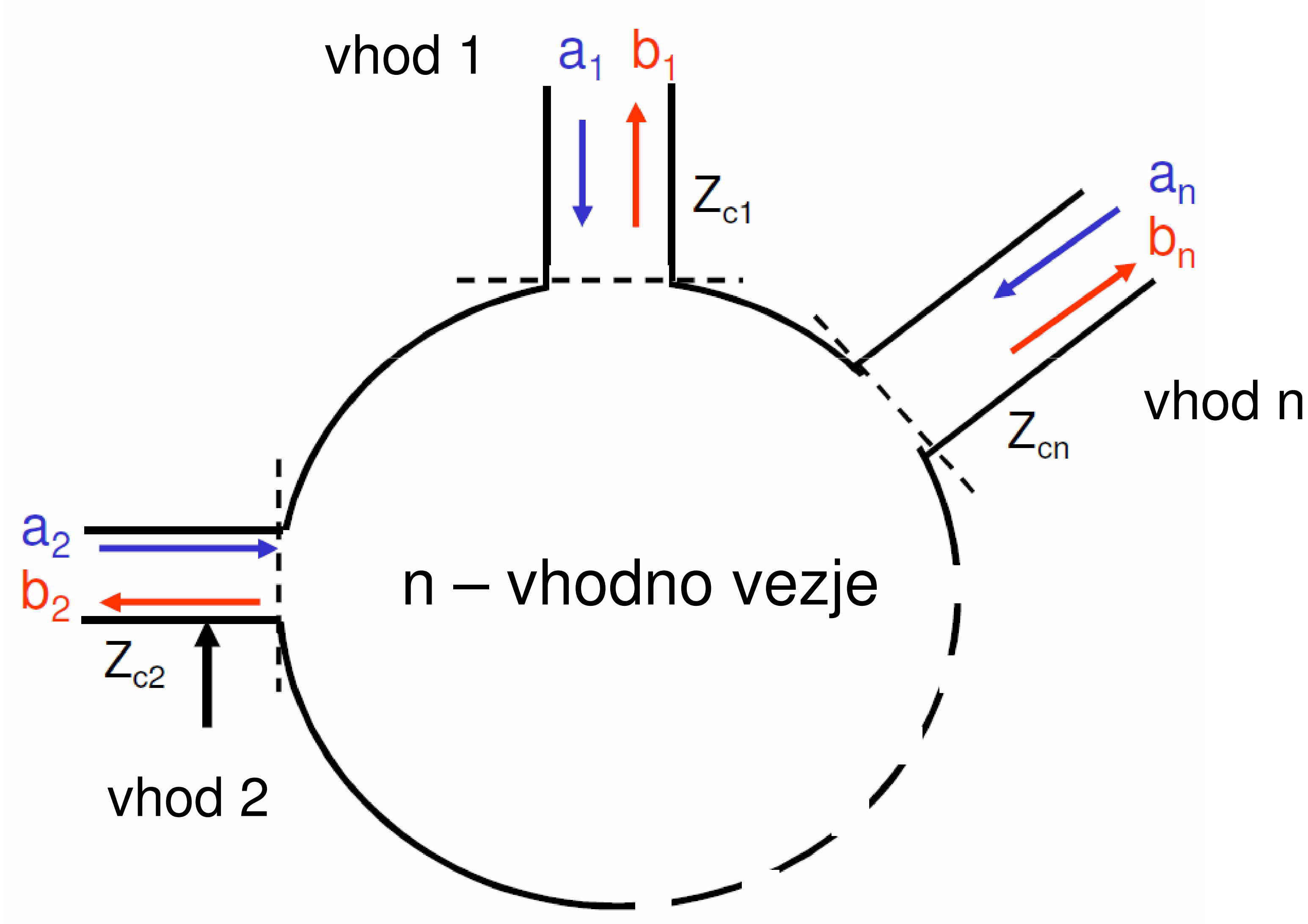
1. Enovhodna (dvopolna) vezja, N = 2
2. Dvovhodna (četveropolna) vezja, N = 4
3. Trovhodna (šesteropolna) vezja, N = 6
4. Četverovhodna (osmeropolna) vezja, N = 8

Po značilnostih sestavnih delov in topologiji:

1. Linearna, nelinearna
2. Recipročna, nerecipročna
3. Simetrična, nesimetrična
4. Izgubna, brez izgub

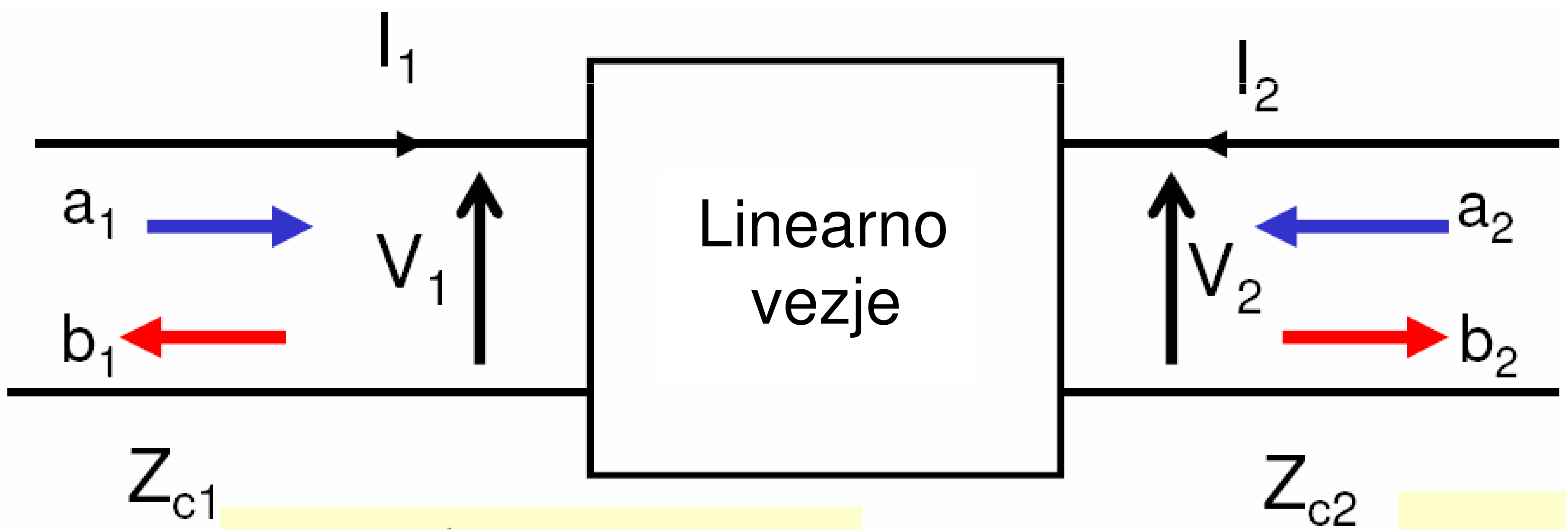
Mikrovalovno n-vhodno vezje

n-vhodno-izhodno vezje ali 2n-polno vezje

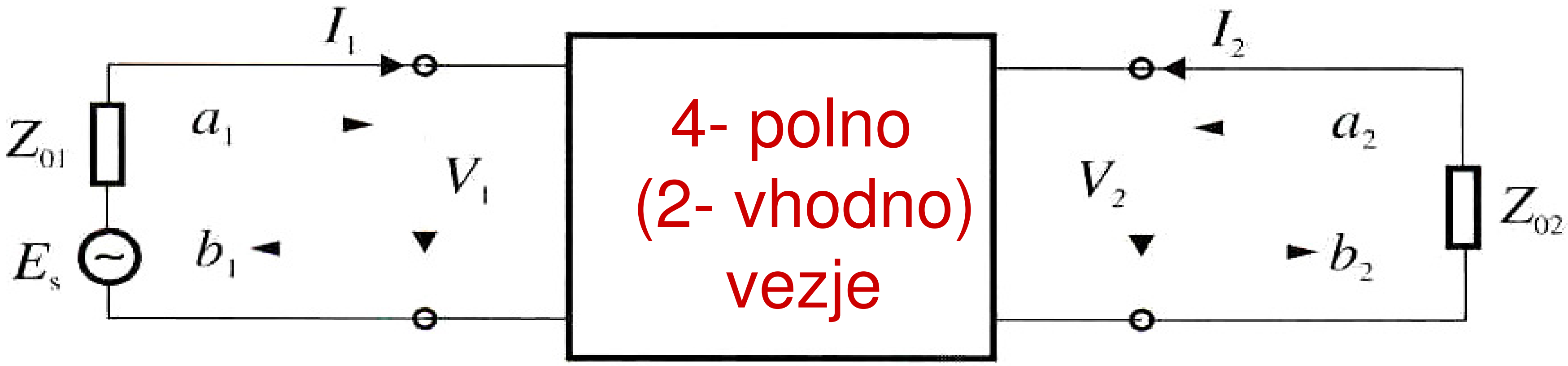


Vhodno-izhodne veličine vezja

- Napetosti in tokovi U_i in I_i
- Potujoči valovi a_i in b_i



Definicija valov



$$V_n = \sqrt{Z_{0n}}(a_n + b_n)$$

$$I_n = \frac{1}{\sqrt{Z_{0n}}}(a_n - b_n)$$

V in *I* pomenita amplitudi.

Z_{0n} pomeni karakteristično impedanco

$$S_{11} = \left.\frac{b_1}{a_1}\right|_{a_2=0} = \frac{V_1/\sqrt{Z_{01}} - \sqrt{Z_{01}}I_1}{V_1/\sqrt{Z_{01}} + \sqrt{Z_{01}}I_1}$$

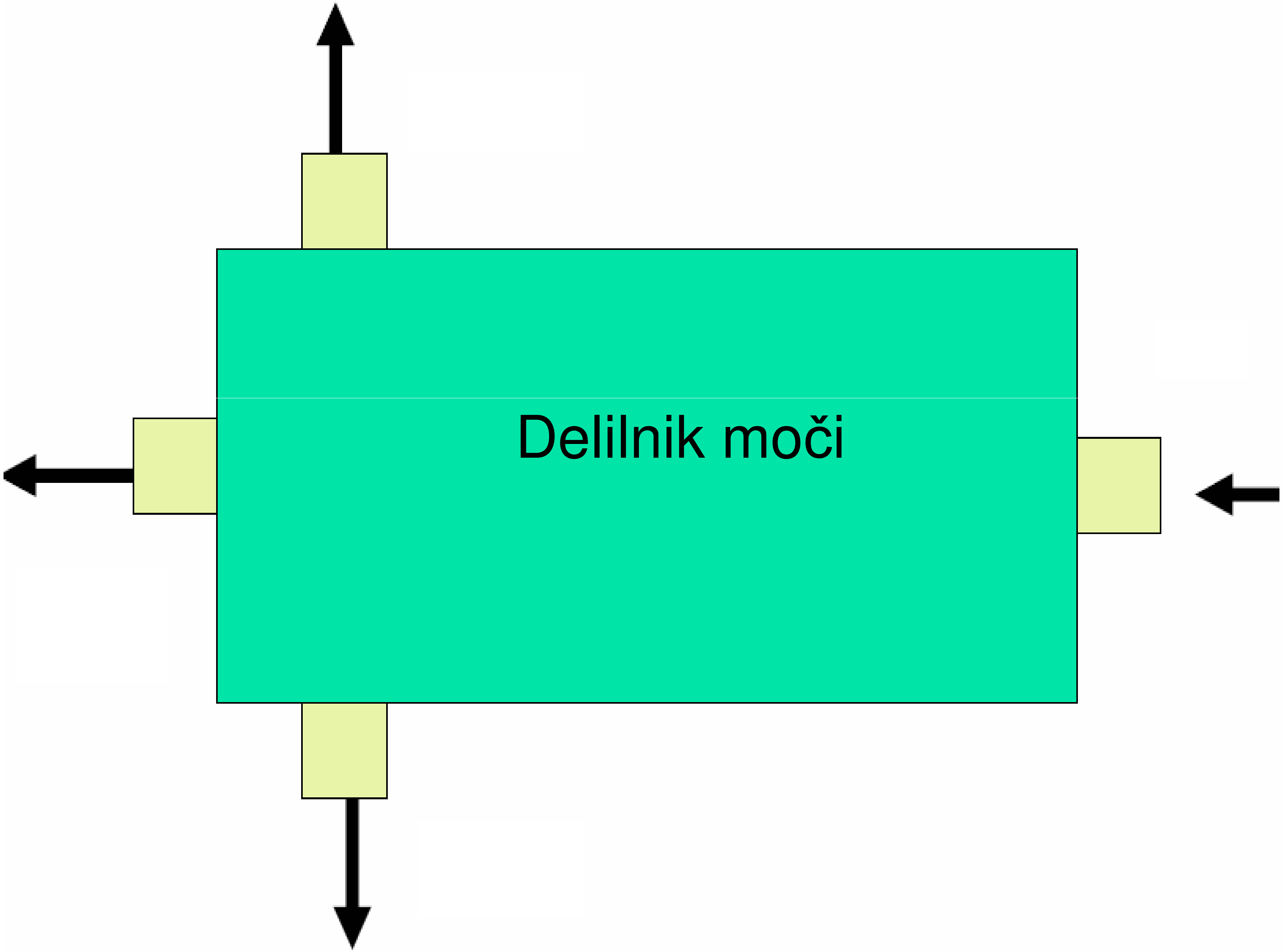
$$a_n = \frac{1}{2}\left(\frac{V_n}{\sqrt{Z_{0n}}} + \sqrt{Z_{0n}}\, I_n\right)$$

$$b_n = \frac{1}{2}\left(\frac{V_n}{\sqrt{Z_{0n}}} - \sqrt{Z_{0n}}\, I_n\right)$$

Moč na n- tem vhodu:

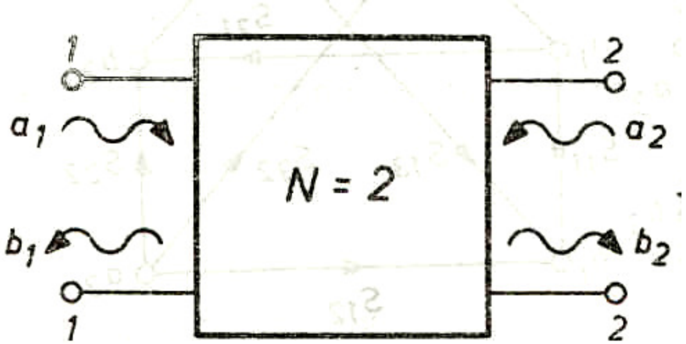
$$\boxed{P_n = \tfrac{1}{2}\mathrm{Re}(V_n \cdot I_n^*) = \tfrac{1}{2}(a_n a_n^* - b_n b_n^*)}$$

Večvhodna vezja

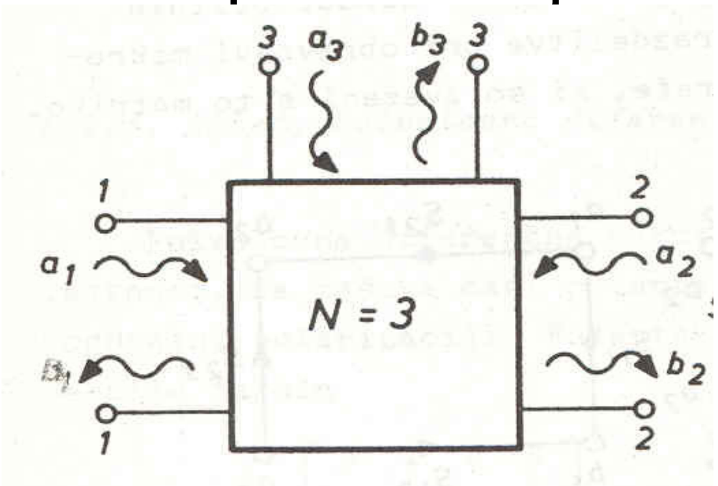


4-polno, 6-polno, 8-polno, 2N-polno vezje

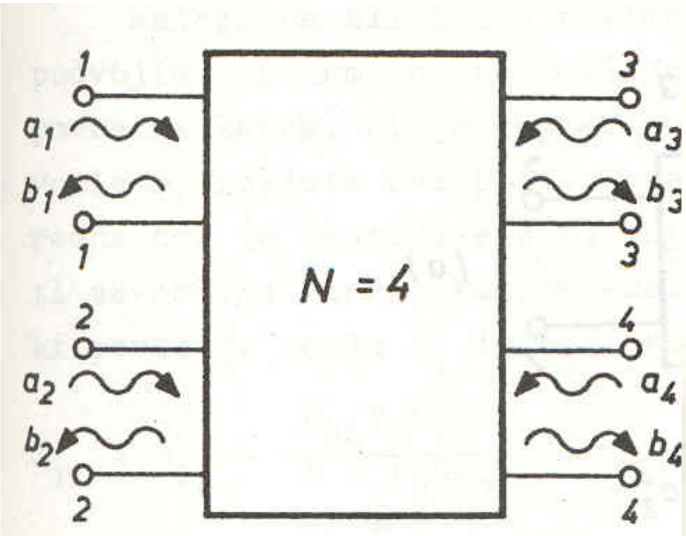
4- polno vezje



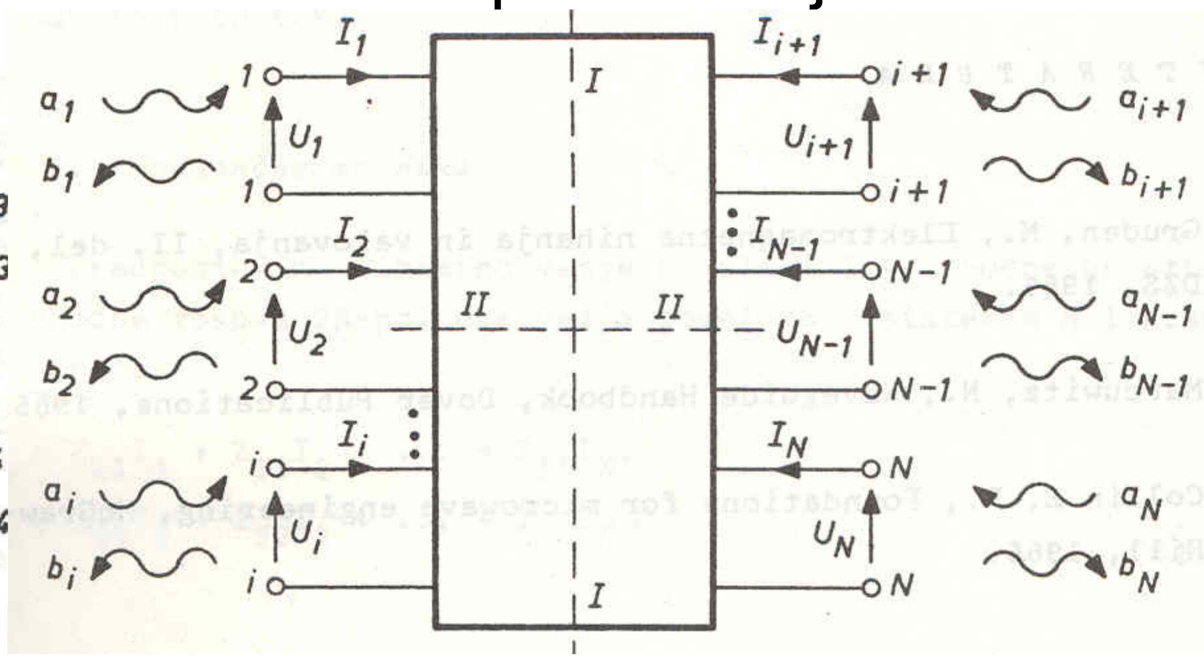
6- polno vezje



8- polno vezje



2N- polno vezje



Matrike za obravnavo električnih vezij

1. Napetostno-tokovne matrike:

- ABCD, Z, Y, H
- Parametri matrik so primerni za obravnavo vhodno-izhodnih napetostno-tokovnih relacij vezij na nižjih frekvenčnih področjih. Parametre določamo pri kratko staknjenih in odprtih priključkih vezja. ABCD ie matrika za verižno vezavo

2. Valovni matriki:

- S, T

Parametri matrik so primerni za uporabo na mikrovalovih, kjer najbolj naravno in neposredno predstavljajo valovne pojave. Parametre določamo pri zaključitvi vezja s prilagojenim bremenom brez odboja. T je matrika za verižno vezavo.

Na matriki S so zasnovane merilne metode in merilni instrumenti, zato se le-ta splošno uporablja v teoriji in praksi.

Izgubnost in brezizgubnost

Pasivno vezje z izgubami:

$$[a_i]^{t*}[a_i]-[b_i]^{t*}[b_i]\geq 0$$

$$[a_i]^{t*}[a_i]-[a_i]^{t*}[S]^{t*}[S][a_i]$$
$$=[a_i]^{t*}\left(U-[S]^{t*}[S]\right)[a_i]\geq 0$$

$$U-[S]^{t*}[S]\geq 0$$

Matrika S NI unitarna

Pasivno vezje brez izgub:

$$[a_i]^{t*}[a_i]-[b_i]^{t*}[b_i]=0$$

$$[a_i]^{t*}[a_i]-[a_i]^{t*}[S]^{t*}[S][a_i]$$
$$=[a_i]^{t*}\left(U-[S]^{t*}[S]\right)[a_i]=0$$

$$U-[S]^{t*}[S]=0$$

Matrika S JE unitarna

Vezje brez izgub, unitarnost matrike [S]

$$\sum_{i=1}^{n} a_i a_i^* = \sum_{i=1}^{n} b_i b_i^*$$

Pogoj za vezje brez izgub v valovni obliki:
Moč vpadnih (vstopajočih) valov je enaka moči odbitih (izstopajočih) valov.

$$[a]^t\ [a]^* = [b]^t\ [b]^* = [a]^t\ [S]^t\ [S]^* [a]^*$$

Pri tem smo upoštevali: $[b]^t=[a]^t[S]^t$ in $[b]^*=[S]^*[a]^*$

$$[a]^t\ ([I] - [S]^t\ [S]^*)\ [a]^* = 0$$

ali $\boxed{[S]^t\ [S]^* = [I]}$ Unitarnost matrike [*S*]

ali $\boxed{[S^*]^t = [S]^{-1}}$

.

Unitarne lastnosti 4- polnega vezja

$$(S^*)^T S = \begin{pmatrix} S_{11}^* & S_{21}^* \\ S_{12}^* & S_{22}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Unitarnost matrike [S]

$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1$$
$$|S_{12}|^2 + |S_{22}|^2 = 1$$
$$S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22} = 0$$

Unitarne enačbe med parametri matrike [S]

sledi:

$$|S_{11}||S_{12}| = |S_{21}||S_{22}|$$
$$-\arg S_{11} + \arg S_{12} = -\arg S_{21} + \arg S_{22} + \pi$$

Vezje je določeno z enim modulom in tremi fazami parametrov matrike [S]

$$|S_{11}| = |S_{22}|, \quad |S_{12}| = |S_{21}|$$
$$|S_{11}| = \sqrt{1 - |S_{12}|^2}$$

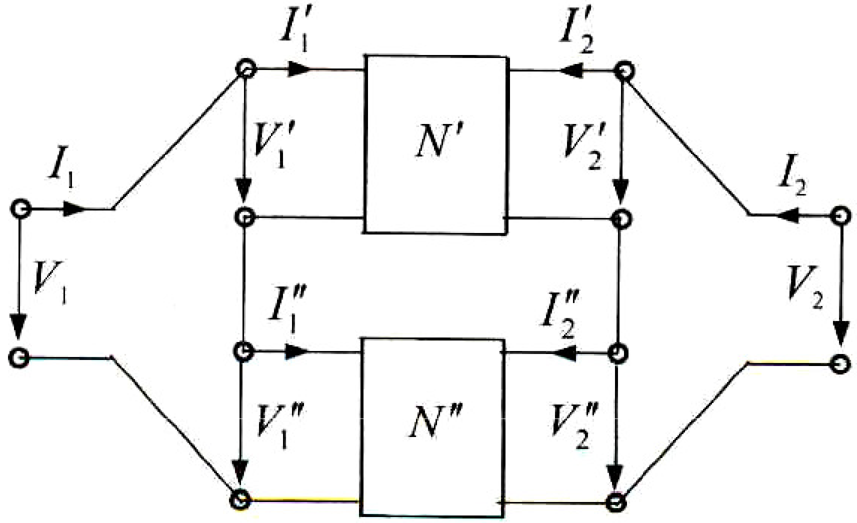
Enačbe modulov

Recipročnost

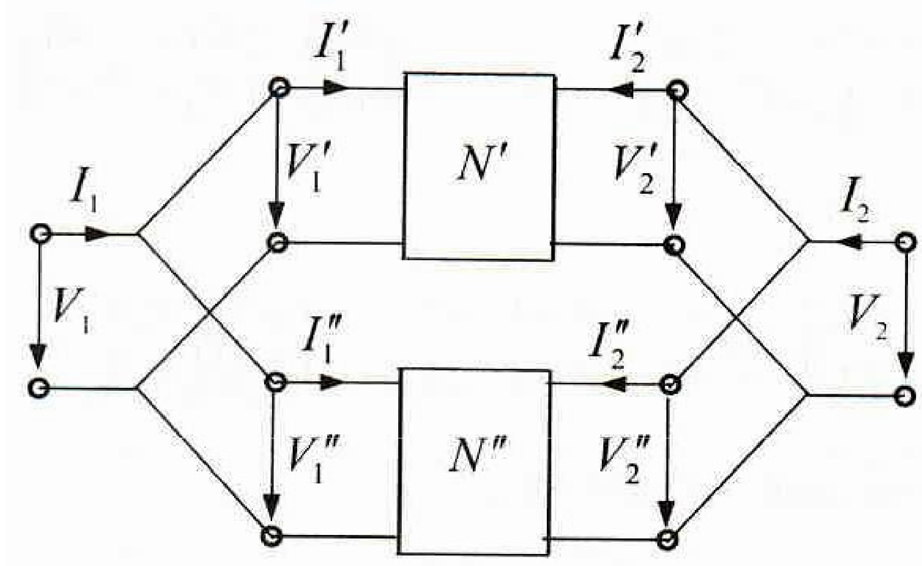
Razen v primerih, ko imamo v notranjosti vezja nerecipročne magnetne materiale, so vezja recipročna.

Vezave vezij

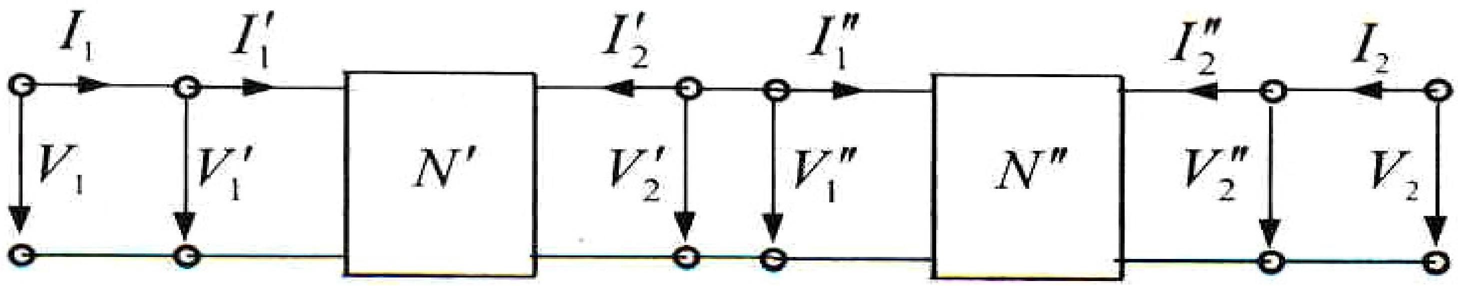
- Zaporedna



- Vzporedna



- Kaskadna (verižna)



Matrike

Valovne enačbe

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_2 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{T_{21}}{T_{11}} & T_{22} - \dfrac{T_{21}T_{12}}{T_{11}} \\ \dfrac{1}{T_{11}} & -\dfrac{T_{12}}{T_{11}} \end{pmatrix}.$$

Napetostno-tokovne

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{1}{S_{21}} & -\dfrac{S_{22}}{S_{21}} \\ \dfrac{S_{11}}{S_{21}} & S_{12} - \dfrac{S_{11}S_{22}}{S_{21}} \end{pmatrix}.$$

Napetostno-tokovne zveze

Matrika impedanc:

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{21} & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ Z_{N1} & \cdots & \cdots & Z_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix}$$

$$Z_{ij} = \frac{V_i}{I_j}\bigg|_{I_k = 0 \, for \, k \neq j}$$

Linearna zveza vhodnih napetosti in vhodnih tokov z matriko Z

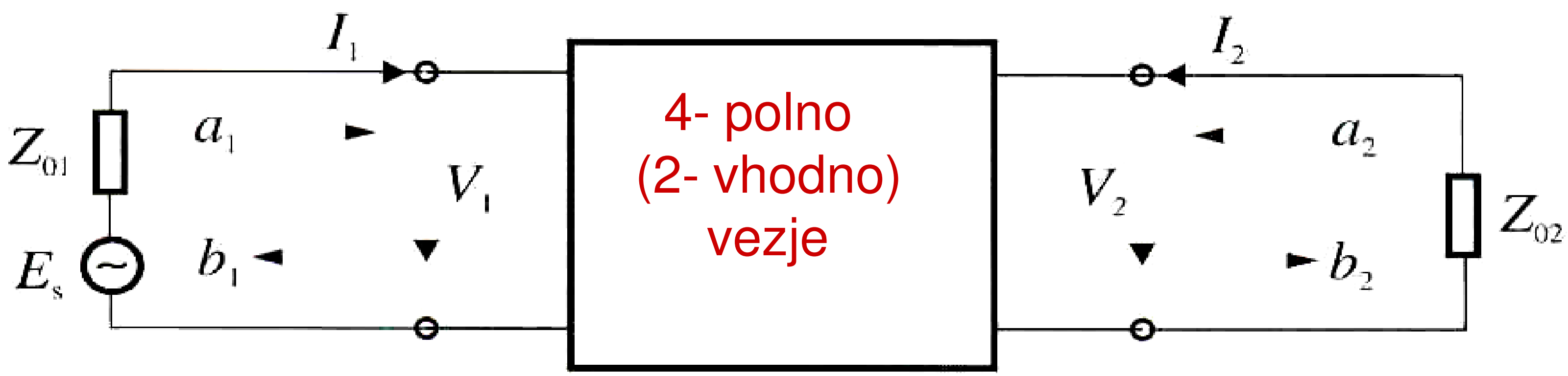
Matrika admitanc:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ Y_{N1} & \cdots & \cdots & Y_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{pmatrix}$$

$$Y_{ij} = \frac{I_i}{V_j}\bigg|_{V_k = 0 \, for \, k \neq j}$$

Linearna zveza vhodnih tokov in vhodnih nape-tosti z matriko Y

Matrike 4- polnih vezij 1/3



- Impedančna matrika:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$Z_{11} = \left.\frac{V_1}{I_1}\right|_{I_2=0} \qquad Z_{12} = \left.\frac{V_1}{I_2}\right|_{I_1=0}$$

$$Z_{21} = \left.\frac{V_2}{I_1}\right|_{I_2=0} \qquad Z_{22} = \left.\frac{V_2}{I_2}\right|_{I_1=0}$$

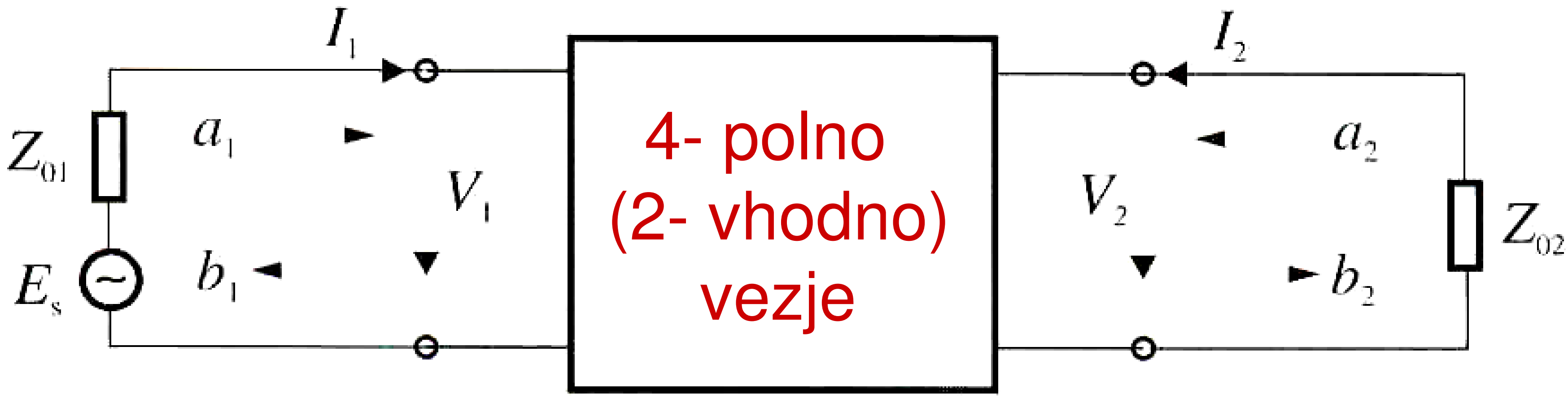
- Admitančna matrika

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$Y_{11} = \left.\frac{I_1}{V_1}\right|_{V_2=0} \qquad Y_{12} = \left.\frac{I_1}{V_2}\right|_{V_1=0}$$

$$Y_{21} = \left.\frac{I_2}{V_1}\right|_{V_2=0} \qquad Y_{22} = \left.\frac{I_2}{V_2}\right|_{V_1=0}$$

Matrike 4- polnih vezij 2/3



- Prenosna matrika ABCD

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix}$$

$$A = \left.\frac{V_1}{V_2}\right|_{I_2=0} \qquad B = \left.\frac{V_1}{-I_2}\right|_{V_2=0}$$

$$C = \left.\frac{I_1}{V_2}\right|_{I_2=0} \qquad D = \left.\frac{I_1}{-I_2}\right|_{V_2=0}$$

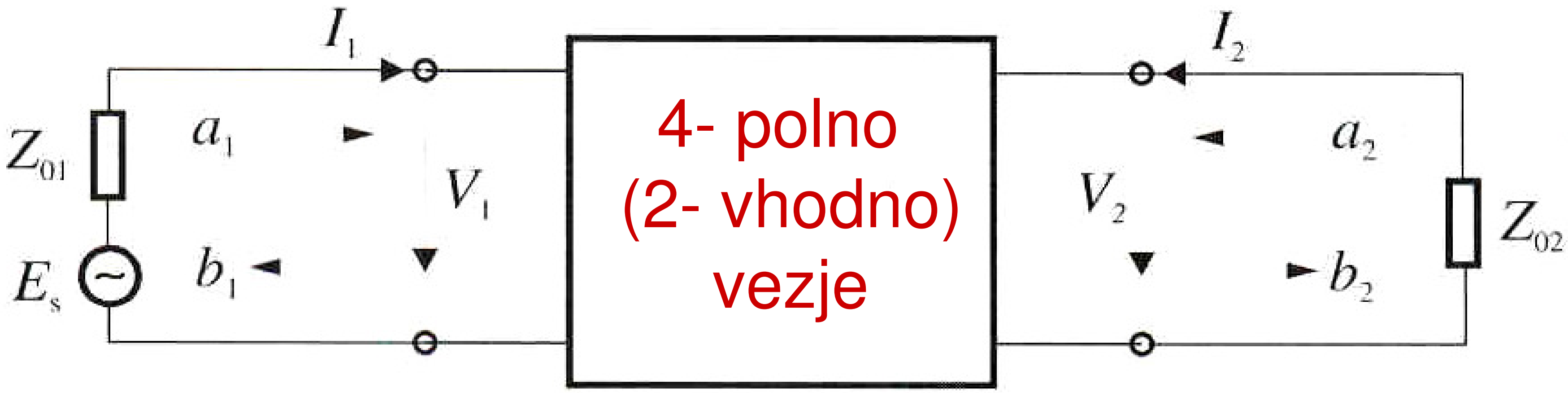
- Valovna matrika S

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

$$S_{11} = \left.\frac{b_1}{a_1}\right|_{a_2=0} \qquad S_{12} = \left.\frac{b_1}{a_2}\right|_{a_1=0}$$

$$S_{21} = \left.\frac{b_2}{a_1}\right|_{a_2=0} \qquad S_{22} = \left.\frac{b_2}{a_2}\right|_{a_1=0}$$

Matrike 4- polnih vezij 3/3



Matrika [H]

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Prenosna matrika [T]

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_2 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

Parametre matrik definiramo podobno kot v prejšnjih Primerih.

Značilnosti vezja in matrike [S]

1. Notranja prilagojenost: $S_{ii} = 0, \quad i = 1,..., n.$

   Diagonalni elementi matrike so nič. Pri n=2 je $S_{11} = = S_{22} = 0$,

2. Recipročnost: $S_{ij} = S_{ji}, \quad i = 1,...,n; \quad j = 1,...,n; \quad i =/ j.$

   Matrika je simetrična okoli diagonale $[S] = [S]^T$. Pri n = 2 je $S_{12} = S_{21}$.

3. Simetričnost:

   Pri n = 2 je $S_{11} = S_{22}$ in $S_{12} = S_{21}$.

4. Brez izgub:

   Matrika je unitarna: $[S]^{-1} = [S]^{*T}$. Pri n = 2 so $|S_{11}|^2 + + |S_{21}|^2 = 1$, $|S_{12}|^2 + |S_{22}|^2 = 1$ in $S_{11}S_{12}^* + S_{21}S_{22}^* = 0$.

Lastnosti matrik

	Recipročnost	Simetrija	Brezizgubnost	Notranja prilagojenost
Z:	$Z_{ij} = Z_{ji}$	$Z_{ij} = Z_{ji}$ $Z_{ii} = Z_{jj}$	Z_{ij} imag.	
Y:	$Y_{ij} = Y_{ji}$	$Y_{ij} = Y_{ji}$ $Y_{ii} = Y_{jj}$	Y_{ij} imag.	
A:	ABCD = 1	$A = D$	A,D real. B,C imag.	
S:	$S_{ij} = S_{ji}$	$S_{ij} = S_{ji}$ $S_{ii} = S_{jj}$	$\lvert S_{11}\rvert^2 + \lvert S_{21}\rvert^2 = 1$ $\lvert S_{12}\rvert^2 + \lvert S_{22}\rvert^2 = 1$ $S_{11} S_{12}^* + S_{21} S_{22}^* = 0$	$S_{ii} = 0$

Valovna matrika [S] 4- polnega vezja

a_1 vpadni val
$b1$ odbiti val

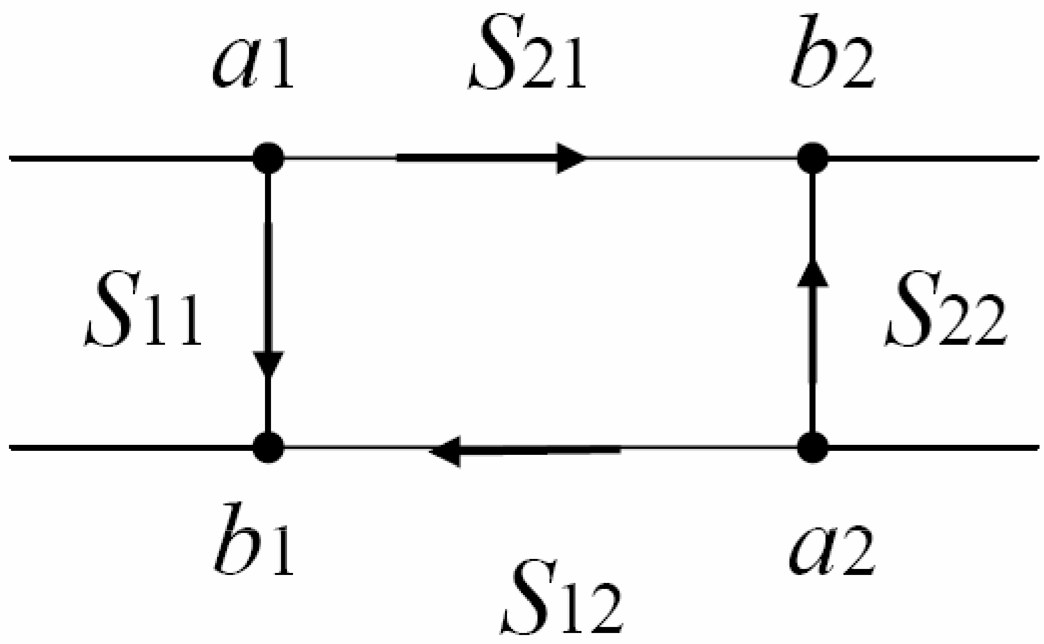
a_2 vpadni val
b_2 odbiti val

Matrična enačba:

$$[b] = [S]\,[a]$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

Valovne enačbe in smerni graf



$$b_1 = a_1 S_{11} + a_2 S_{12}$$

$$b_2 = a_1 S_{21} + a_2 S_{22}$$

Smerni graf je nazorna predstavitev linearnih enačb vezja.

Definicije parametrov matrike S

$$S_{11} = \left.\frac{b_1}{a_1}\right|_{a_2=0} \qquad \frac{\text{odbiti val na vhodu 1}}{\text{vpadni val na vhodu 1}} \quad \text{pri prilagojenem izhodu 2}$$

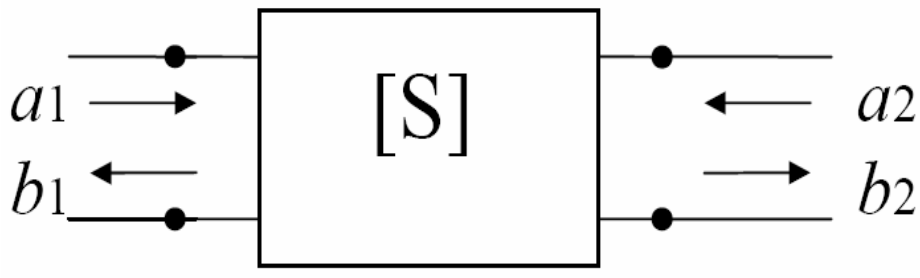
$$S_{21} = \left.\frac{b_2}{a_1}\right|_{a_2=0} \qquad \frac{\text{odbiti val na vhodu 2}}{\text{vpadni val na vhodu 1}} \quad \text{pri prilagojenem izhodu 2}$$

$$S_{12} = \left.\frac{b_1}{a_2}\right|_{a_1=0} \qquad \frac{\text{odbiti val na vhodu 1}}{\text{vpadni val na vhodu 2}} \quad \text{pri prilagojenem izhodu 1}$$

$$S_{22} = \left.\frac{b_2}{a_2}\right|_{a_1=0} \qquad \frac{\text{odbiti val na vhodu 2}}{\text{vpadni val na vhodu 2}} \quad \text{pri prilagojenem izhodu 1}$$

$$b_1 = a_1 S_{11} + a_2 S_{12}$$

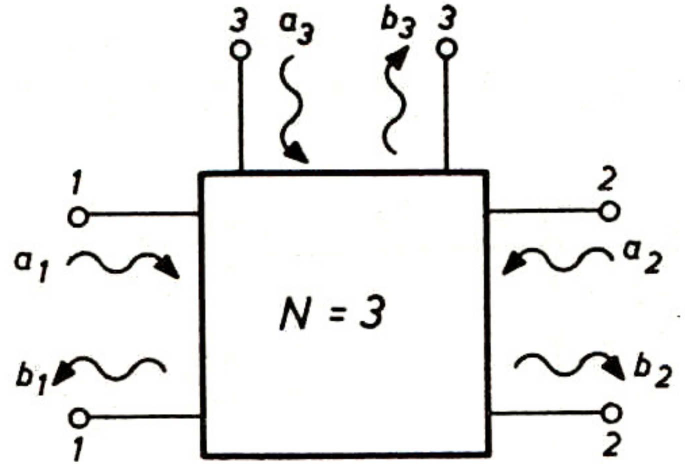
$$b_2 = a_1 S_{21} + a_2 S_{22}$$



6-polna vezja; matrika [S]

6-polni (3-vhodno) vezje določa matrika S reda 3x3

$$[S]=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}$$

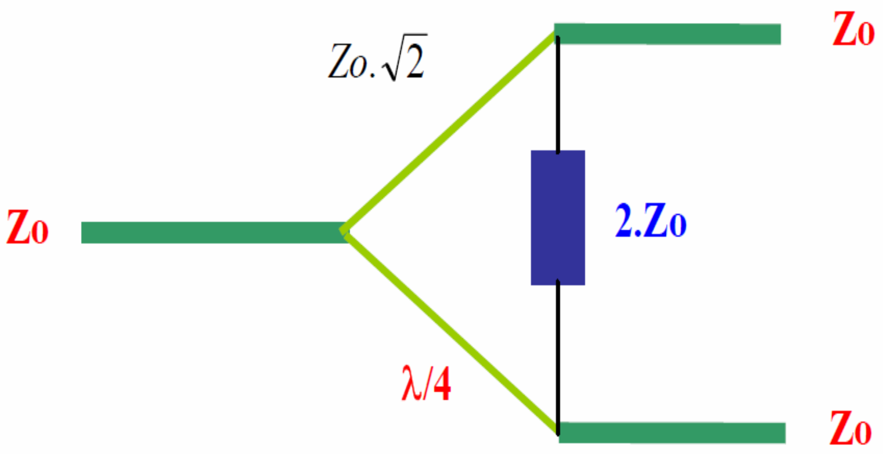


6-polna mikrovalovna vezja obsegajo:

- Mikrovalovna hibridna vezja
- Delilna in združevalna vezja

izdelano v:

- valovodni tehniki
- tehniki planarnih trakastih in mikrotrakastih vodnikov



Wilkinsonov delilnik

Značilna 6- polna vezja

$$[S]=\begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & 0 \end{bmatrix}$$

Notranje prilagojeno, nerecipročno vezje brez izgub. Obstaja

$$[S]=\begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & 0 & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix}$$

Notranje neprilagojeno, recipročno vezje brez izgub. Vsaj en vhod je neprilagojen. Obstaja

$$[S]=\begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & 0 & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & 0 \end{bmatrix}$$

Notranje prilagojeno recipročno vezje brez izgub. Ne obstaja!

Protislovne enačbe!

S parametri 6- polnega vezja

Splošno

$$[S]=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}$$

Recipročno vezje brez izgub

$$\boxed{\sum_{k=1}^{N} S_{ki} S_{ki}^{*} = 1}$$

$$\boxed{\sum_{k=1}^{N} S_{ki} S_{kj}^{*} = 0 \qquad for\ i \neq j}$$

$$|S_{11}| + |S_{12}| + |S_{13}| = 1$$

$$S_{11} S_{21}^{*} + S_{12} S_{22}^{*} + S_{13} S_{23}^{*} = 0$$

$$|S_{21}| + |S_{22}| + |S_{23}| = 1$$

$$S_{21} S_{31}^{*} + S_{22} S_{32}^{*} + S_{23} S_{33}^{*} = 0$$

$$|S_{31}| + |S_{32}| + |S_{33}| = 1$$

$$S_{11} S_{31}^{*} + S_{12} S_{32}^{*} + S_{13} S_{33}^{*} = 0$$

Protislovnost enačb

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1 \qquad S_{13}^{*} S_{23} = 0$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{23}|^2 = 1 \qquad S_{23}^{*} S_{12} = 0$$

$$|S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 = 1 \qquad S_{12}^{*} S_{13} = 0$$

Na primer $S_{13} = 0$, sledi $S_{12} = 1$, sledi $S_{23} = 0$, sledi $S_{13} = 1$, protislovje z zadnjo enačbo!

6- polno, recipročno in notranje prilagojeno vezje ne obstaja.

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1, \quad S_{13}^{*} S_{23} = 0, \Rightarrow \; S_{13}^{*} = 0 \rightarrow |S_{12}|^2 = 1$$

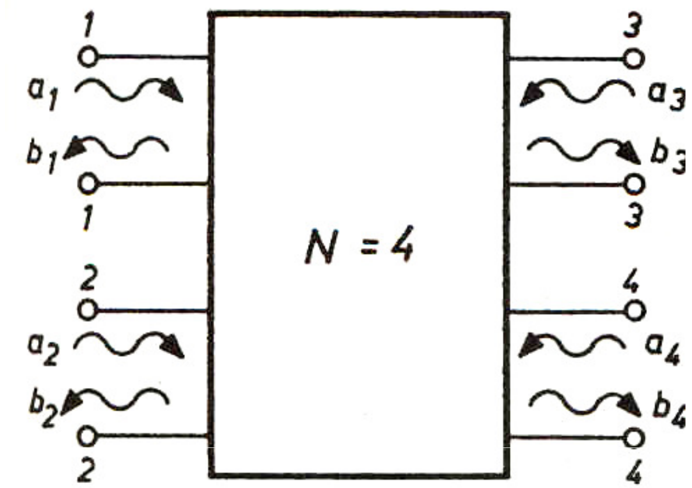
$$|S_{12}|^2 + |S_{23}|^2 = 1, \quad S_{23}^{*} S_{12} = 0, \Rightarrow \; S_{23}^{*} = 0 \rightarrow |S_{12}|^2 = 1$$

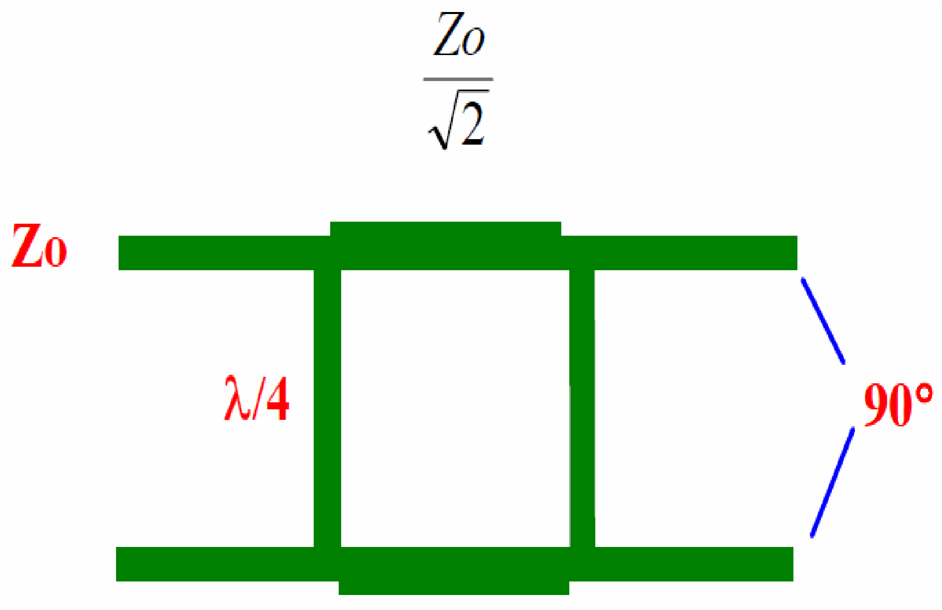
$$|S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 = 1, \quad S_{12}^{*} S_{13} = 0. \downarrow |S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 = 0 \neq 1$$

8-polno vezje; matrika [S]

8-polno (4-vhodno) vezje določimo z matriko S reda 4x4:

$$[S]=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix}$$





8-polna mikrovalovna vezja obsegajo:

- Mikrovalovna hibridna vezja
- Smerne sklopnike

izdelane v:

- valovodni tehniki
- tehniki planarnih trakastih in mikrotrakastih vodnikov

Unitarne enačbe 8- polnega vezja

$$(1,1): |S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 + |S_{14}|^2 = 1, \quad (1,2): S_{13}^* S_{23} + S_{14}^* S_{24} = 0,$$

$$(2,2): |S_{12}|^2 + |S_{23}|^2 + |S_{24}|^2 = 1, \quad (3,4): S_{14}^* S_{13} + S_{24}^* S_{23} = 0,$$

$$(3,3): |S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 + |S_{34}|^2 = 1, \quad (1,3): S_{12}^* S_{23} + S_{14}^* S_{34} = 0,$$

$$(4,4): |S_{14}|^2 + |S_{24}|^2 + |S_{34}|^2 = 1, \quad (2,4): S_{14}^* S_{12} + S_{34}^* S_{23} = 0,$$

$$(2,3): S_{12}^* S_{13} + S_{24}^* S_{34} = 0$$

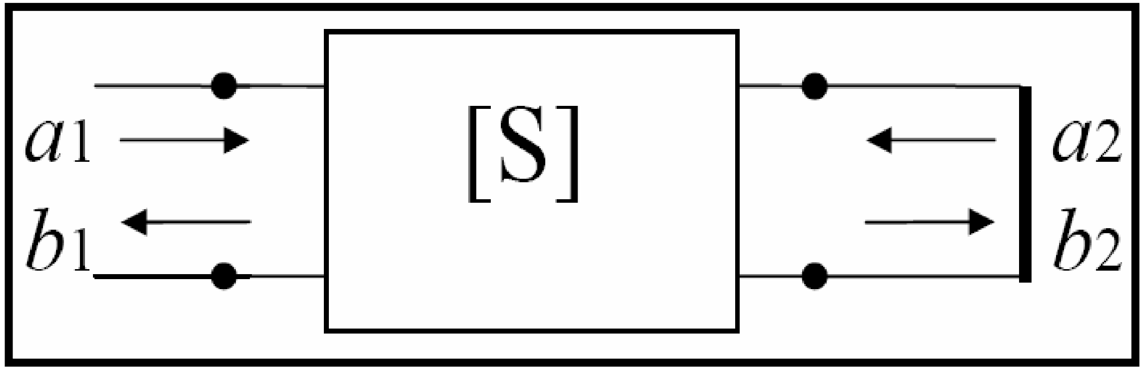
$$S_{24}^* \left(S_{13}^* S_{23} + S_{14}^* S_{24}\right) - S_{13}^* \left(S_{14}^* S_{13} + S_{24}^* S_{23}\right) = S_{14}^* \left(|S_{24}|^2 - |S_{13}|^2\right) = 0$$

$$S_{12} \left(S_{12}^* S_{23} + S_{14}^* S_{34}\right) - S_{34} \left(S_{14}^* S_{12} + S_{34}^* S_{23}\right) = S_{23} \left(|S_{12}|^2 - |S_{34}|^2\right) = 0$$

$$\Rightarrow S_{14} = S_{23} = 0$$

Lastnost vezja je smerni sklop!!

Vhodna odbojnost kratkostaknjenega vezja



$a_2 = - b_2$ kratkostaknjen izhodni priključek

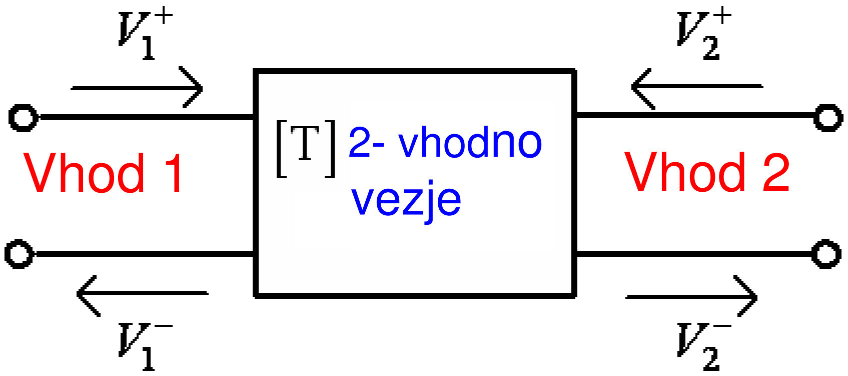
$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 = S_{11}a_1 - S_{12}b_2$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 = S_{21}a_1 - S_{22}b_2$$

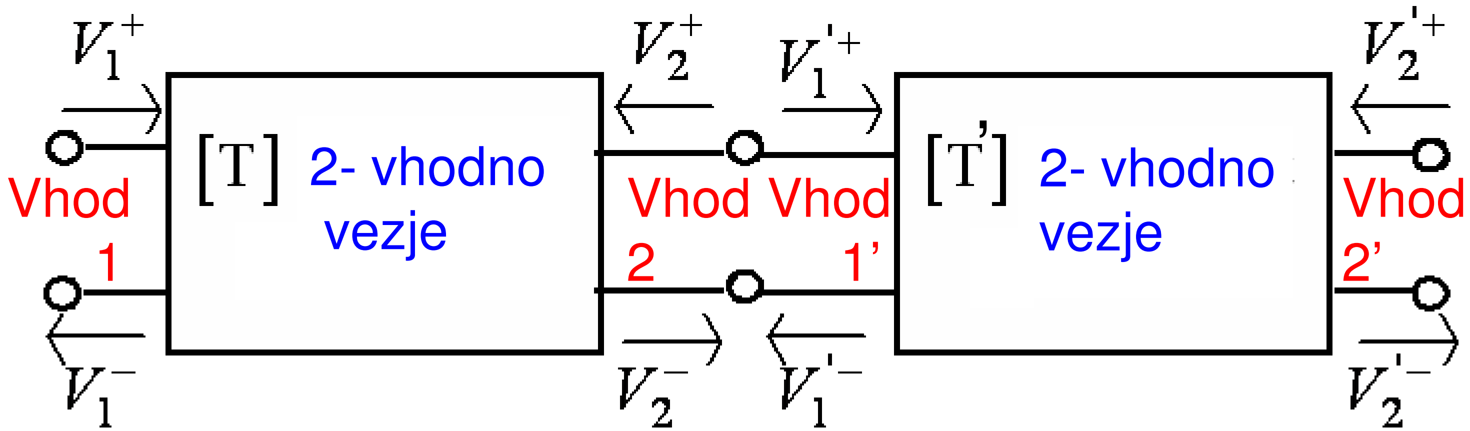
$$b_2 = \frac{S_{21}}{1+S_{22}} a_1$$

$$\boxed{\Gamma = \frac{b_1}{a_1} = S_{11} - S_{12}\frac{b_2}{a_1} = S_{11} - \frac{S_{12}S_{21}}{1+S_{22}} = 0.1 - \frac{(j0.8)(j0.8)}{1+0.2} = 0.633}$$

Vezji v kaskadi, nadomestna matrika [T]



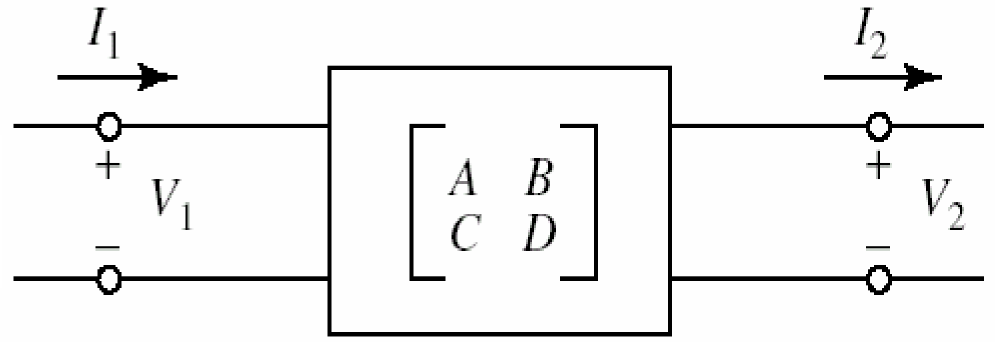
$$\begin{vmatrix} V_1^+ \\ V_1^- \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_2^+ \\ V_2^- \end{vmatrix}$$



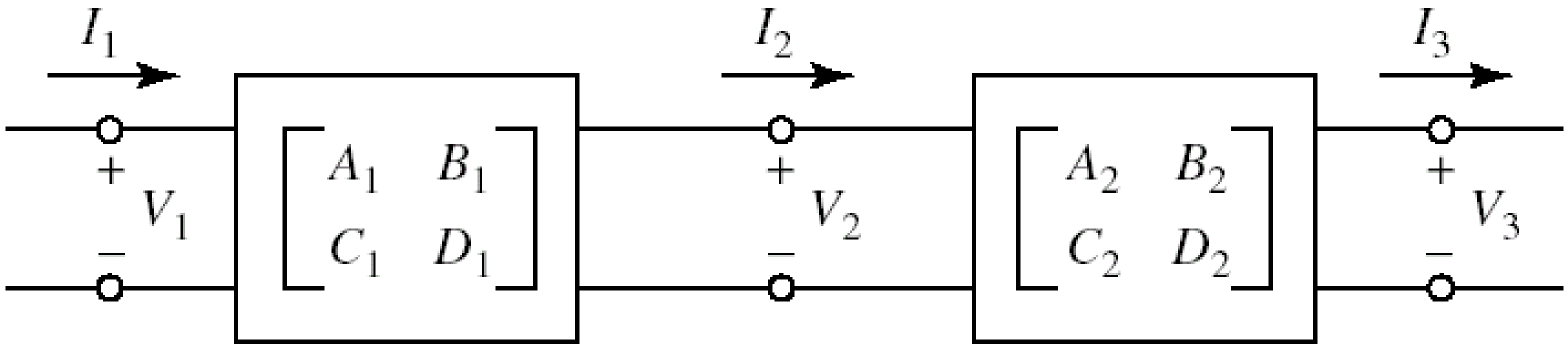
Nadomestna matrika je produkt matrik

$$\begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_1^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{11}^{'} & T_{12}^{'} \\ T_{21}^{'} & T_{22}^{'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2^+ \\ V_2^- \end{bmatrix}$$

Vezji v kaskadi, nadomestna matrika [A]



$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

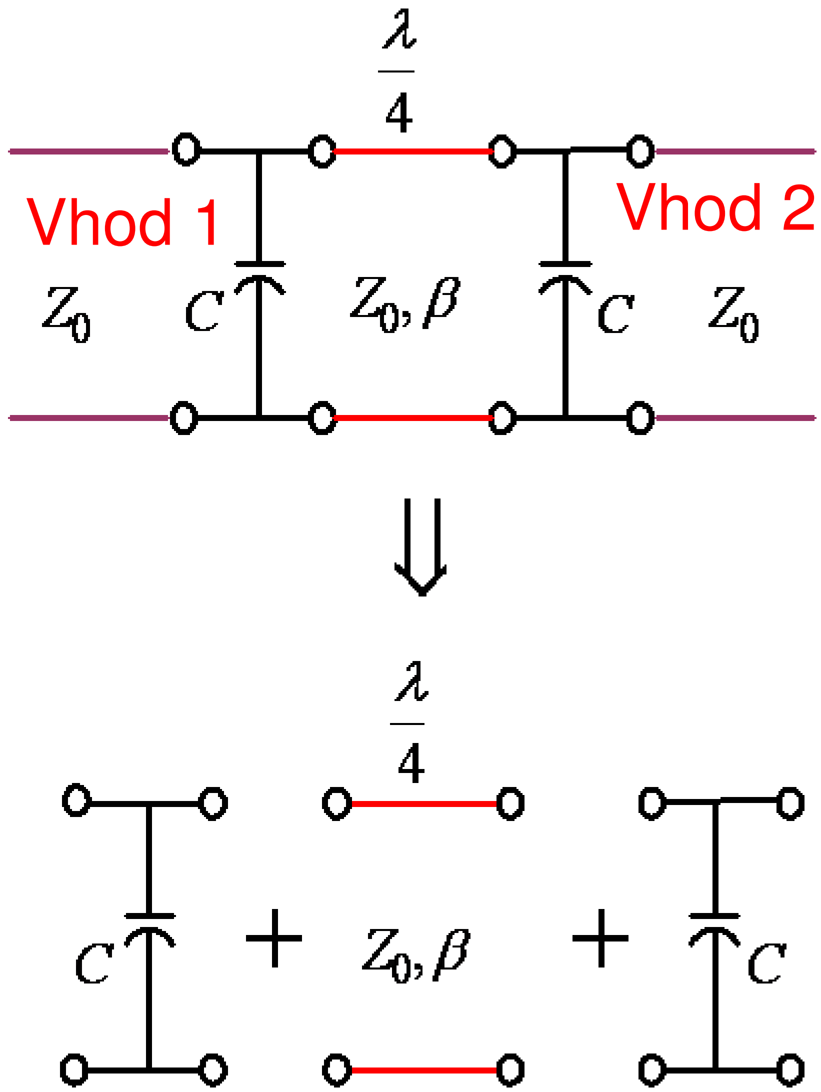


$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Nadomestna matrika [A] je produkt matrik [A_1] in [A_2].

Primer: Kaskada z matriko A

Vezje iz treh elementov v kaskadi:
Vzporedna C, linija, vzporedna C



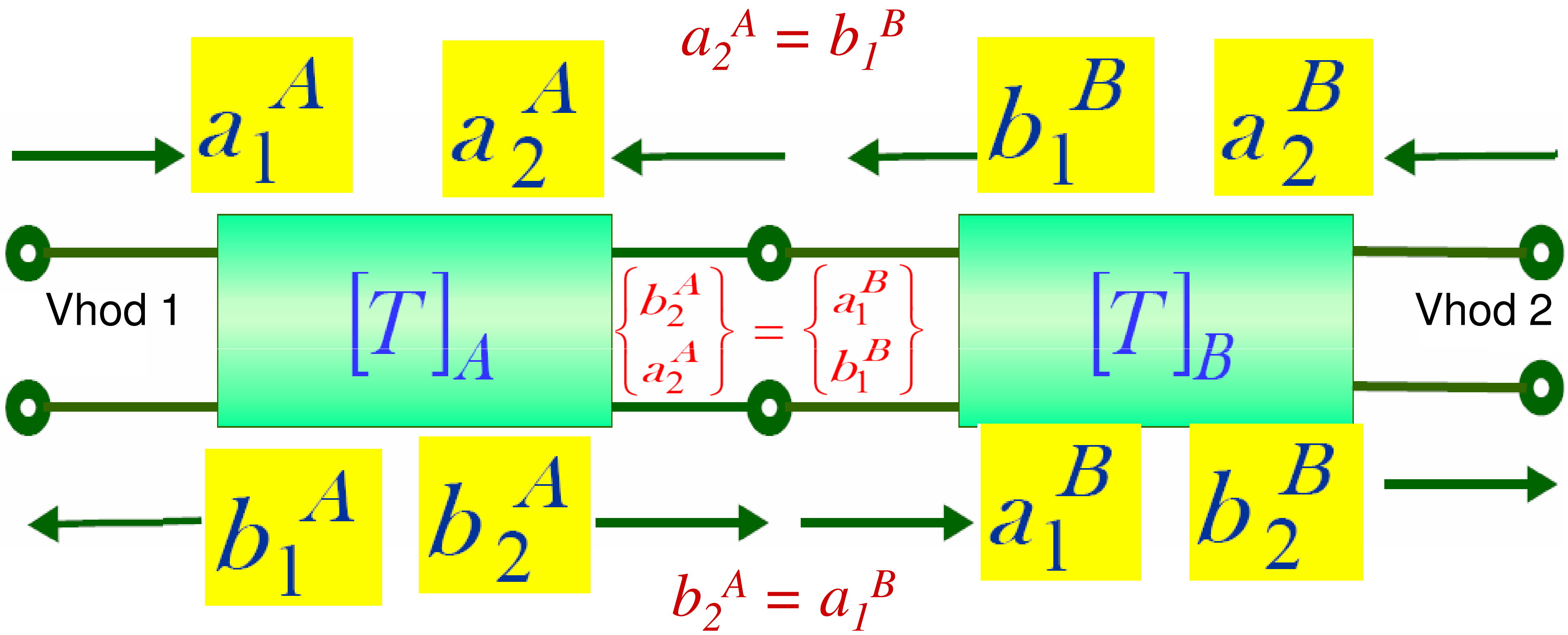
$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\frac{\pi}{2} & jZ_0 \sin\frac{\pi}{2} \\ jY_0 \sin\frac{\pi}{2} & \cos\frac{\pi}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ j\omega C \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & jZ_0 \\ jY_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -\omega C Z_0 & jZ_0 \\ -j\omega^2 C^2 Z_0 + jY_0 & -\omega C Z_0 \end{bmatrix}$$

Matrika T, kaskadna vezava

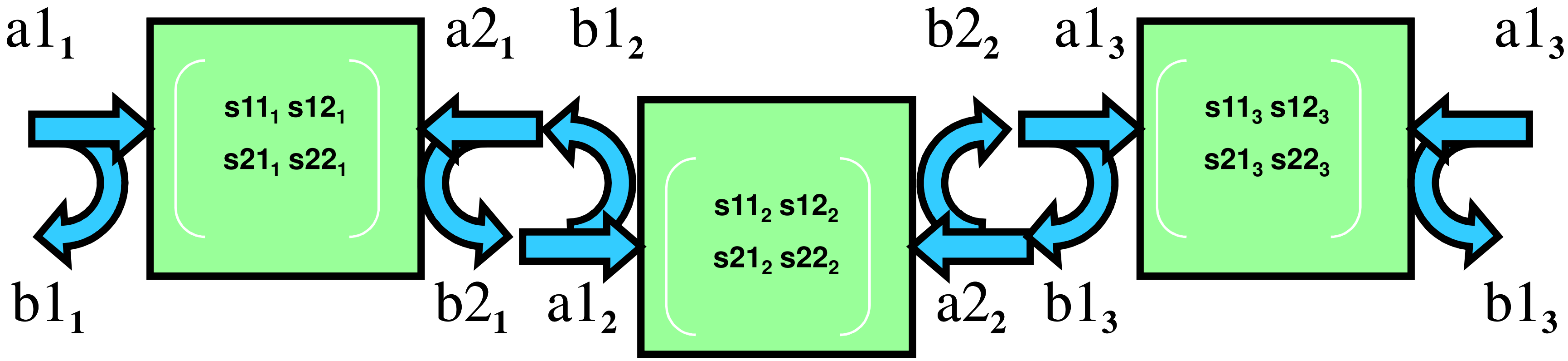


$$\boxed{[T] = [T]_A [T]_B}$$

Matrike T kaskadnih vezij se množijo.

Vezja v kaskadi in matrika [*S*]

Kaskadna vezava treh dvovhodnih vezij



- Matrika T ima prednost pri obravnavi kaskadnih vezav
- Matriki S dajemo prednost spričo pomena njenih parametrov
- Metoda 1: Daljšo kaskado obravnavamo z matriko T in rezultat pretvorimo v matriko S
- Metoda 2: Krajšo vezavo obravnavamo z matriko S na osnovi smernih grafov. Pri reševanju smernih grafov uporabljamo metodo dekompozicije (redukcije) ali Masonovo pravilo.

Zveza med parametri matrik [S] in [Z]

S - Z	Z - S
$s_{11}=\dfrac{(z_{11}-1)(z_{22}+1)-z_{12}z_{21}}{(z_{11}+1)(z_{22}+1)-z_{12}z_{21}}$	$z_{11}=\dfrac{(1+s_{11})(1-s_{22})+s_{12}s_{21}}{(1-s_{11})(1-s_{22})-s_{12}s_{21}}$
$s_{12}=\dfrac{2z_{12}}{(z_{11}+1)(z_{22}+1)-z_{12}z_{21}}$	$z_{12}=\dfrac{2s_{12}}{(1-s_{11})(1-s_{22})-s_{12}s_{21}}$
$s_{21}=\dfrac{2z_{21}}{(z_{11}+1)(z_{22}+1)-z_{12}z_{21}}$	$z_{21}=\dfrac{2s_{21}}{(1-s_{11})(1-s_{22})-s_{12}s_{21}}$
$s_{22}=\dfrac{(z_{11}+1)(z_{22}-1)-z_{12}z_{21}}{(z_{11}+1)(z_{22}+1)-z_{12}z_{21}}$	$z_{22}=\dfrac{(1+s_{22})(1-s_{11})+s_{12}s_{21}}{(1-s_{11})(1-s_{22})-s_{12}s_{21}}$
$z_{ij} = Z_{ij}/Z_0$ normirane vrednosti	

Zveza med parametri matrik [S] in [Y]

S - Y	Y - S
$s_{11} = \dfrac{(1-y_{11})(1+y_{22})+y_{12}y_{21}}{(1+y_{11})(1+y_{22})-y_{12}y_{21}}$	$y_{11} = \dfrac{(1+s_{22})(1-s_{11})+s_{12}s_{21}}{(1+s_{11})(1+s_{22})-s_{12}s_{21}}$
$s_{12} = \dfrac{-2y_{12}}{(1+y_{11})(1+y_{22})-y_{12}y_{21}}$	$y_{12} = \dfrac{-2s_{12}}{(1+s_{11})(1+s_{22})-s_{12}s_{21}}$
$s_{21} = \dfrac{-2y_{21}}{(1+y_{11})(1+y_{22})-y_{12}y_{21}}$	$y_{21} = \dfrac{-2s_{21}}{(1+s_{11})(1+s_{22})-s_{12}s_{21}}$
$s_{22} = \dfrac{(1+y_{11})(1-y_{22})+y_{12}y_{21}}{(1+y_{11})(1+y_{22})-y_{12}y_{21}}$	$y_{22} = \dfrac{(1+s_{11})(1-s_{22})+s_{12}s_{21}}{(1+s_{11})(1+s_{22})-s_{12}s_{21}}$
$y_{ij} = Y_{ij}/Y_0$ normirane vrednosti	

Zveza med parametri matrik [S] in [H]

S - H	H - S
$s_{11}=\frac{(h_{11}-1)(h_{22}+1)-h_{12}h_{21}}{(h_{11}+1)(h_{22}+1)-h_{12}h_{21}}$	$h_{11}=\frac{(1+s_{11})(1+s_{22})-s_{12}s_{21}}{(1-s_{11})(1+s_{22})+s_{12}s_{21}}$
$s_{12}=\frac{2h_{12}}{(h_{11}+1)(h_{22}+1)-h_{12}h_{21}}$	$h_{12}=\frac{2s_{12}}{(1-s_{11})(1+s_{22})+s_{12}s_{21}}$
$s_{21}=\frac{-2h_{21}}{(h_{11}+1)(h_{22}+1)-h_{12}h_{21}}$	$h_{21}=\frac{-2s_{21}}{(1-s_{11})(1+s_{22})+s_{12}s_{21}}$
$s_{22}=\frac{(1+h_{11})(1-h_{22})+h_{12}h_{21}}{(h_{11}+1)(h_{22}+1)-h_{12}h_{21}}$	$h_{22}=\frac{(1-s_{22})(1-s_{11})-s_{12}s_{21}}{(1-s_{11})(1+s_{22})+s_{12}s_{21}}$

Zveze med parametri matrik 2/2

	$ABCD$	Y	Z
S_{11}	$\dfrac{A + B/Z_0 - CZ_0 - D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$	$\dfrac{(Y_0 - Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}}$	$\dfrac{(Z_{11} - Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$
S_{12}	$\dfrac{2(AD - BC)}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$	$\dfrac{-2Y_{12}Y_0}{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}}$	$\dfrac{2Z_{12}Z_0}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$
S_{21}	$\dfrac{2}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$	$\dfrac{-2Y_{21}Y_0}{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}}$	$\dfrac{2Z_{21}Z_0}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$
S_{22}	$\dfrac{-A + B/Z_0 - CZ_0 + D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$	$\dfrac{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 - Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}}$	$\dfrac{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} - Z_0) - Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$

(*b*) *ABCD* parameters in terms of *S*, *Y*, and *Z* parameters

	S	Y	Z
A	$\dfrac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\dfrac{-Y_{22}}{Y_{21}}$	$\dfrac{Z_{11}}{Z_{21}}$
B	$Z_0\,\dfrac{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\dfrac{-1}{Y_{21}}$	$\dfrac{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}}{Z_{21}}$
C	$\dfrac{1}{Z_0}\,\dfrac{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\dfrac{-(Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21})}{Y_{21}}$	$\dfrac{1}{Z_{21}}$
D	$\dfrac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\dfrac{-Y_{11}}{Y_{21}}$	$\dfrac{Z_{22}}{Z_{21}}$

Zveze med parametri matrik 1/2

	$ABCD$	Y	Z
S_{11}	$\dfrac{A + B/Z_0 - CZ_0 - D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$	$\dfrac{(Y_0 - Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}}$	$\dfrac{(Z_{11} - Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$
S_{12}	$\dfrac{2(AD - BC)}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$	$\dfrac{-2Y_{12}Y_0}{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}}$	$\dfrac{2Z_{12}Z_0}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$
S_{21}	$\dfrac{2}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$	$\dfrac{-2Y_{21}Y_0}{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}}$	$\dfrac{2Z_{21}Z_0}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$
S_{22}	$\dfrac{-A + B/Z_0 - CZ_0 + D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$	$\dfrac{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 - Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{(Y_0 + Y_{11})(Y_0 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}}$	$\dfrac{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} - Z_0) - Z_{12}Z_{21}}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{12}Z_{21}}$

(*b*) *ABCD* parameters in terms of *S*, *Y*, and *Z* parameters

	S	Y	Z
A	$\dfrac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\dfrac{-Y_{22}}{Y_{21}}$	$\dfrac{Z_{11}}{Z_{21}}$
B	$Z_0 \dfrac{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\dfrac{-1}{Y_{21}}$	$\dfrac{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}}{Z_{21}}$
C	$\dfrac{1}{Z_0} \dfrac{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\dfrac{-(Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21})}{Y_{21}}$	$\dfrac{1}{Z_{21}}$
D	$\dfrac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\dfrac{-Y_{11}}{Y_{21}}$	$\dfrac{Z_{22}}{Z_{21}}$

Zveze med parametri matrik 2/2

	S	Z	Y	$ABCD$
S_{11}	S_{11}	$\frac{(Z_{11}-Z_0)(Z_{22}+Z_0)-Z_{12}Z_{21}}{\Delta Z}$	$\frac{(Y_0-Y_{11})(Y_0+Y_{22})+Y_{12}Y_{21}}{\Delta Y}$	$\frac{A+B/Z_0-CZ_0-D}{A+B/Z_0+CZ_0+D}$
S_{12}	S_{12}	$\frac{2Z_{12}Z_0}{\Delta Z}$	$\frac{-2Y_{12}Y_0}{\Delta Y}$	$\frac{2(AD-BC)}{A+B/Z_0+CZ_0+D}$
S_{21}	S_{21}	$\frac{2Z_{21}Z_0}{\Delta Z}$	$\frac{-2Y_{21}Y_0}{\Delta Y}$	$\frac{2}{A+B/Z_0+CZ_0+D}$
S_{22}	S_{22}	$\frac{(Z_{11}+Z_0)(Z_{22}-Z_0)-Z_{12}Z_{21}}{\Delta Z}$	$\frac{(Y_0+Y_{11})(Y_0-Y_{22})+Y_{12}Y_{21}}{\Delta Y}$	$\frac{-A+B/Z_0-CZ_0+D}{A+B/Z_0+CZ_0+D}$
Z_{11}	$Z_0\frac{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}$	Z_{11}	$\frac{Y_{22}}{\lvert Y\rvert}$	$\frac{A}{C}$
Z_{12}	$Z_0\frac{2S_{12}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}$	Z_{12}	$\frac{-Y_{12}}{\lvert Y\rvert}$	$\frac{AD-BC}{C}$
Z_{21}	$Z_0\frac{2S_{21}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}$	Z_{21}	$\frac{-Y_{21}}{\lvert Y\rvert}$	$\frac{1}{C}$
Z_{22}	$Z_0\frac{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}$	Z_{22}	$\frac{Y_{11}}{\lvert Y\rvert}$	$\frac{D}{C}$
Y_{11}	$Y_0\frac{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}$	$\frac{Z_{22}}{\lvert Z\rvert}$	Y_{11}	$\frac{D}{B}$
Y_{12}	$Y_0\frac{-2S_{12}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}$	$\frac{-Z_{12}}{\lvert Z\rvert}$	Y_{12}	$\frac{BC-AD}{B}$
Y_{21}	$Y_0\frac{-2S_{21}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}$	$\frac{-Z_{21}}{\lvert Z\rvert}$	Y_{21}	$\frac{-1}{B}$
Y_{22}	$Y_0\frac{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}$	$\frac{Z_{11}}{\lvert Z\rvert}$	Y_{22}	$\frac{A}{B}$
A	$\frac{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\frac{Z_{11}}{Z_{21}}$	$\frac{-Y_{22}}{Y_{21}}$	A
B	$Z_0\frac{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\frac{\lvert Z\rvert}{Z_{21}}$	$\frac{-1}{Y_{21}}$	B
C	$\frac{1}{Z_0}\frac{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\frac{1}{Z_{21}}$	$\frac{-\lvert Y\rvert}{Y_{21}}$	C
D	$\frac{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$	$\frac{Z_{22}}{Z_{21}}$	$\frac{-Y_{11}}{Y_{21}}$	D

$\lvert Z\rvert = Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}$; $\lvert Y\rvert = Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21}$; $\Delta Y = (Y_{11}+Y_0)(Y_{22}+Y_0) - Y_{12}Y_{21}$; $\Delta Z = (Z_{11}+Z_0)(Z_{22}+Z_0) - Z_{12}Z_{21}$; $Y_0 = 1/Z_0$

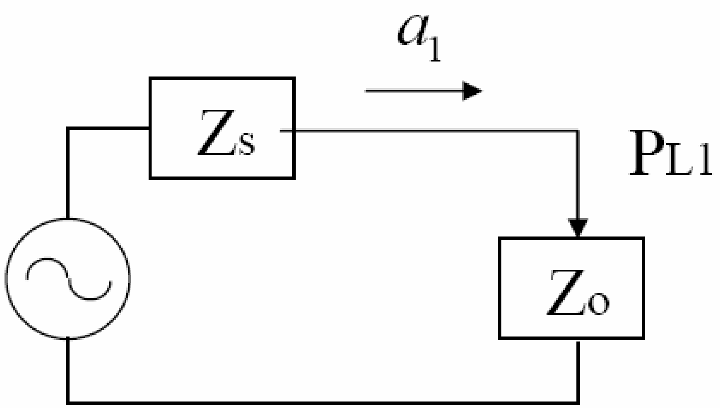
Odbojno in vstavno slabljenje

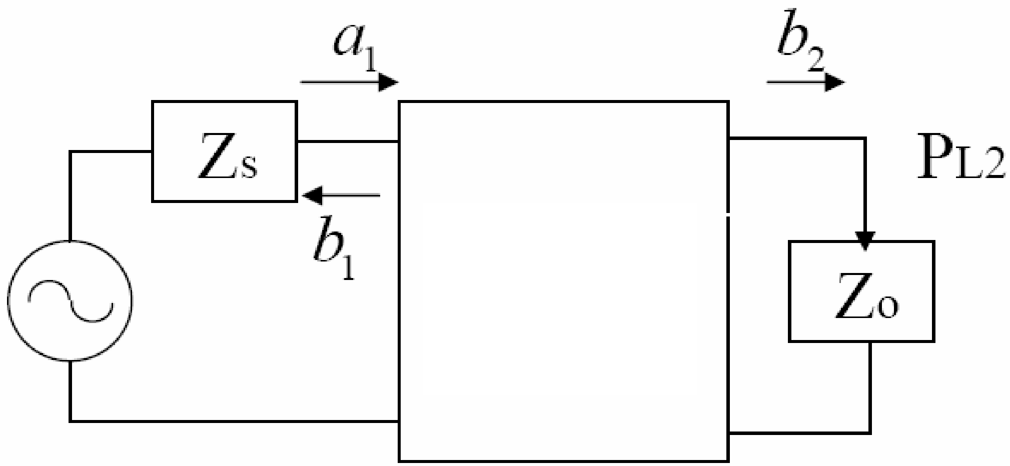
Odbojno slabljenje $LO_{dB} = -20\log\left|\frac{b_1}{a_1}\right| = -20\log|S_{11}|$

Vstavno slabljenje $LV_{dB} = -20\log\left|\frac{b_2}{a_1}\right| = -20\log|S_{21}|$

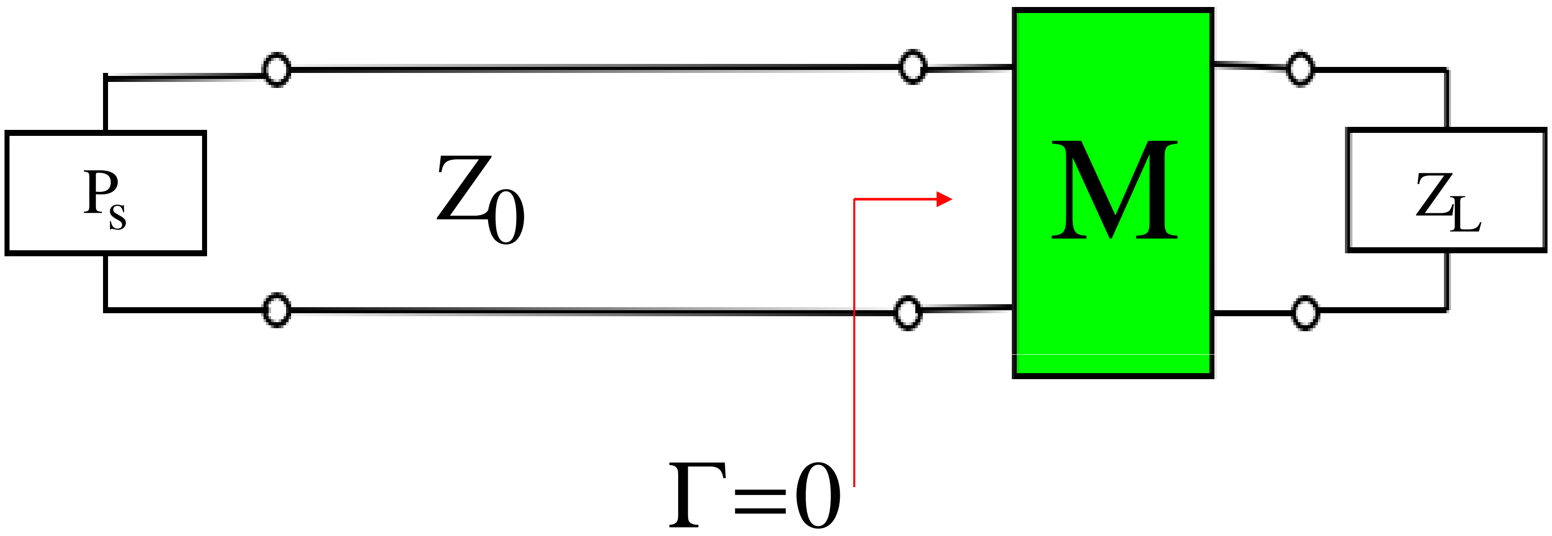
- Odbojno slabljenje – reflection loss
- Vstavno slabljenje – insertion loss

$$\equiv 10\log\frac{P_{L1}}{P_{L2}}$$

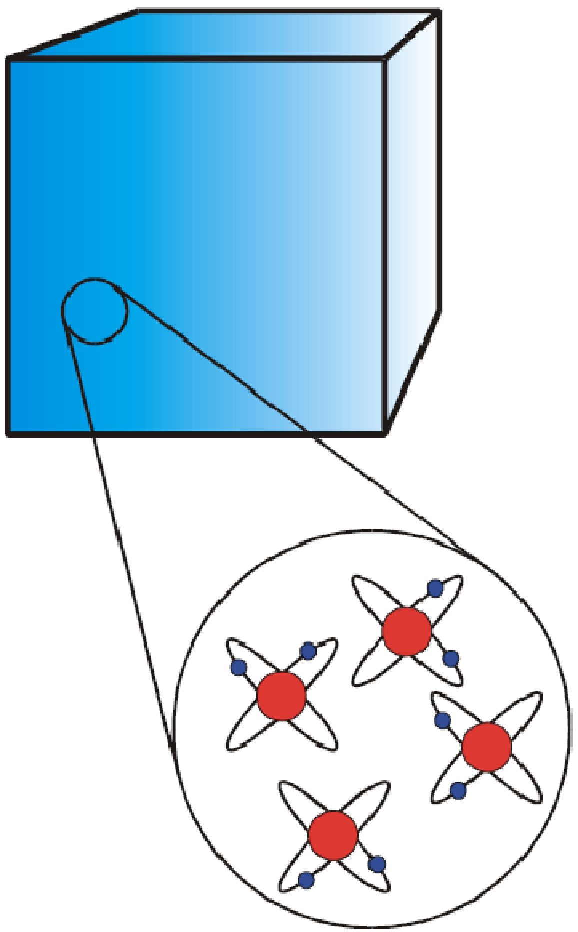


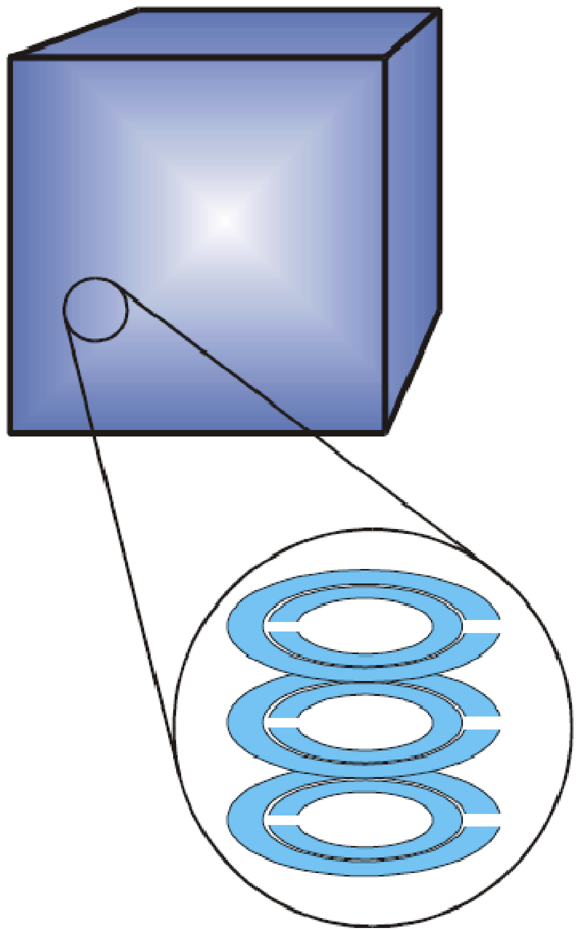


Prilagajanje



Snov in metamateriali





- Lastnost snovi izvira iz atomske strukture.
- Lastnost snovi je odvisna od oblikovanja periodične strukture.

Razvrstitev snovi

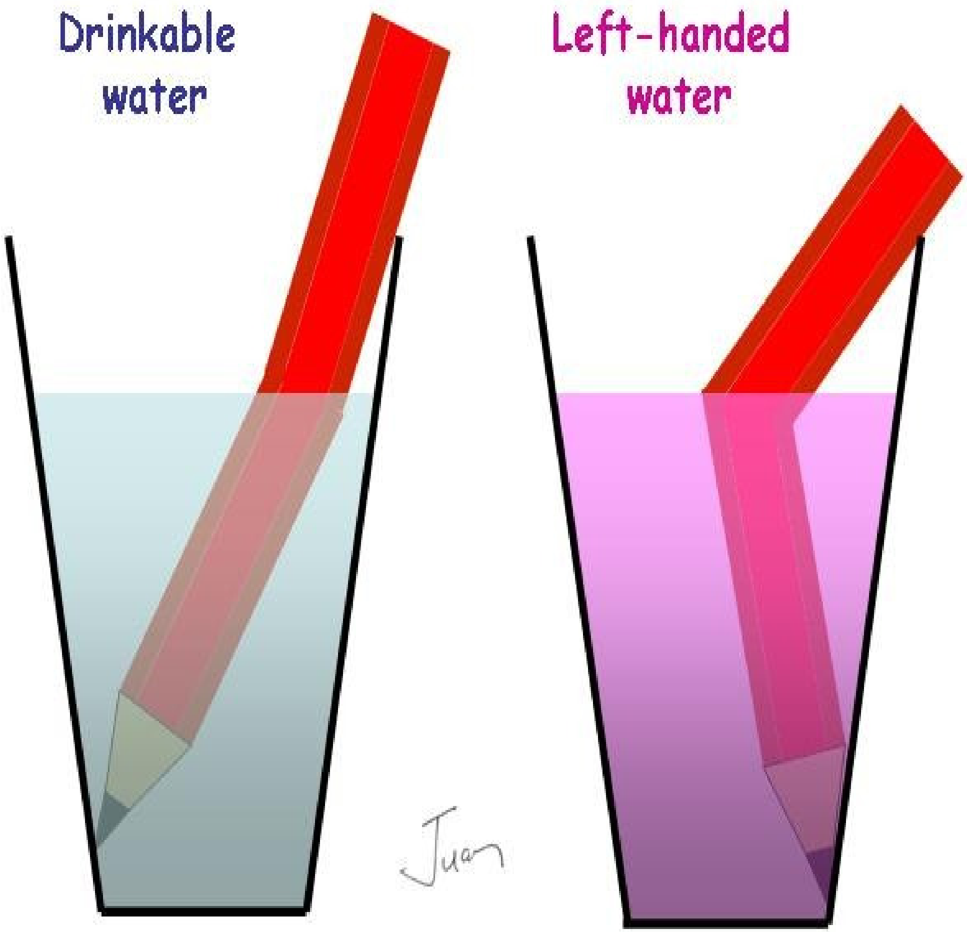
$$n = \pm\sqrt{\varepsilon\mu}$$

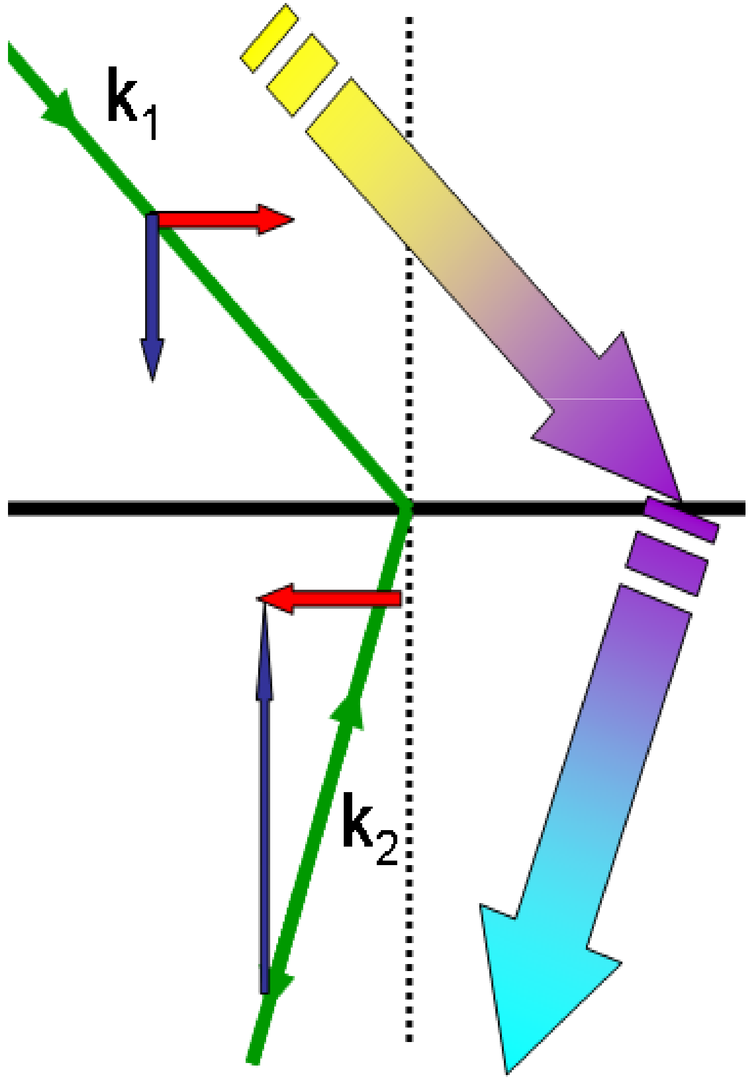
ali

$$n = \pm\sqrt{(-\varepsilon)(-\mu)}$$

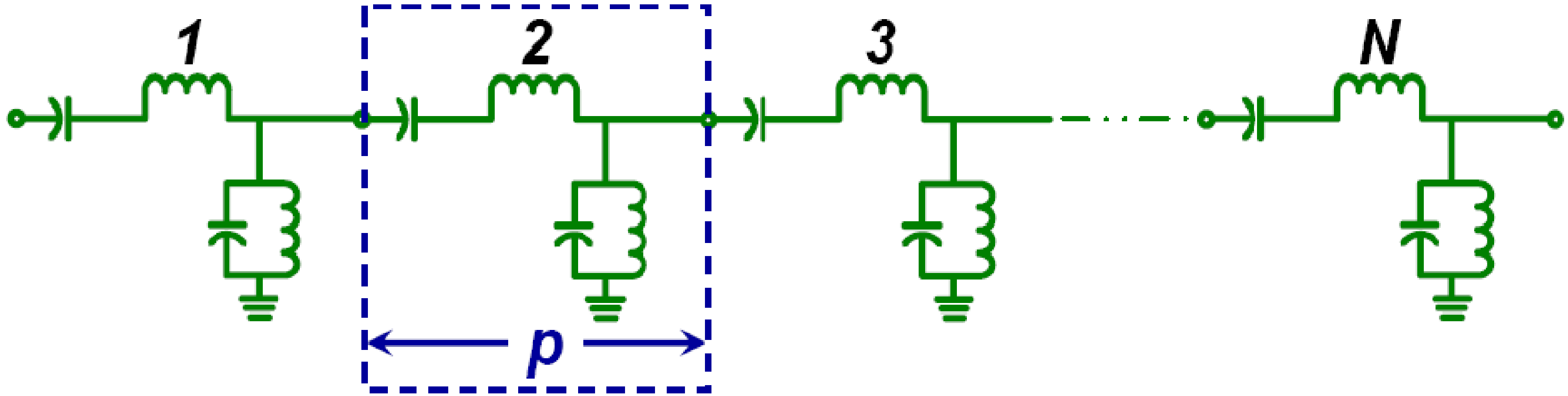
Slabljenje	**+ε, -μ** ✗	**+ε, +μ** ✗	Pozitivna refrakcija
Negativna refrakcija	**-ε, -μ** ✓	**-ε, +μ** ✗	Slabljenje

Metamateriali – negativni lom



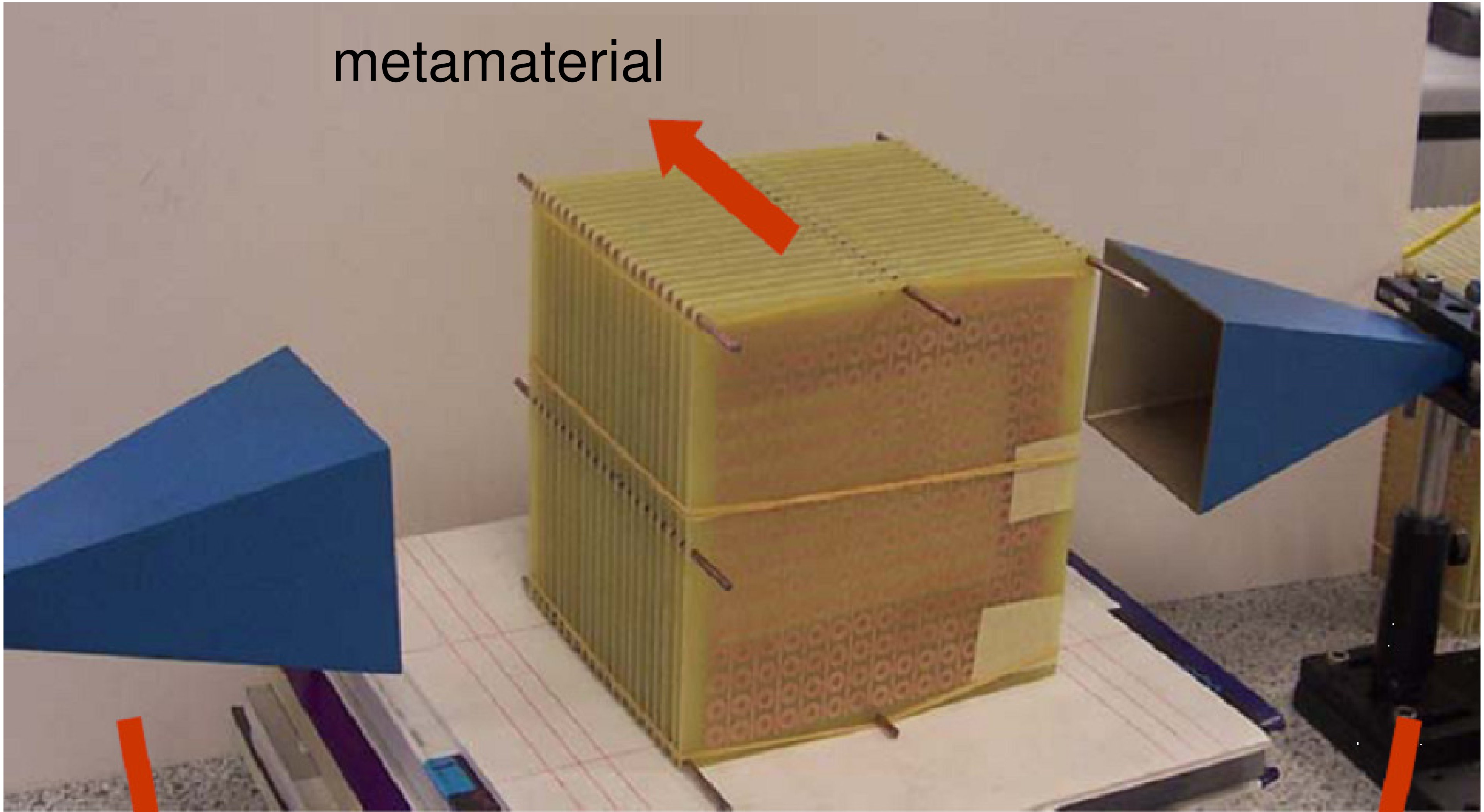


Metamateriali – porazdeljeni elementi



- Linije iz običajnih materialov: prevladuje serijski L nad serijskim C in paralelni C nad paralelnim L.
- Linije iz metamaterialov: prevladuje serijski C nad serijskom L in paralelni L nad paralelnim C.
- Lastnosti: negativna lomnost, levoročni materiali, fokusiranje, super resolucija, nevidnost in drugo
- Uporaba: mikrovalovna vezja, antene.

Metamateriali - eksperiment



Sklep

Matrična obravnava vezij s porazdeljenimi elementi je uspešno sredstvo za analizo teh vezij.

Obravnavo vezij s porazdeljenimi elementi opiramo predvsem na valovno matriko porazdelitve [S]. Na njeni osnovi so se razvile sodobne merilne metode.

Glede na temeljne lastnosti vezja (recipročnost, brez izgub in drugo) lahko vnaprej določimo posebne karakteristike posameznih vezij.

Kaskadna vezja obravnavamo tudi z matriko [S], kot pripomoček uporabljamo smerne grafe signala.

Konec