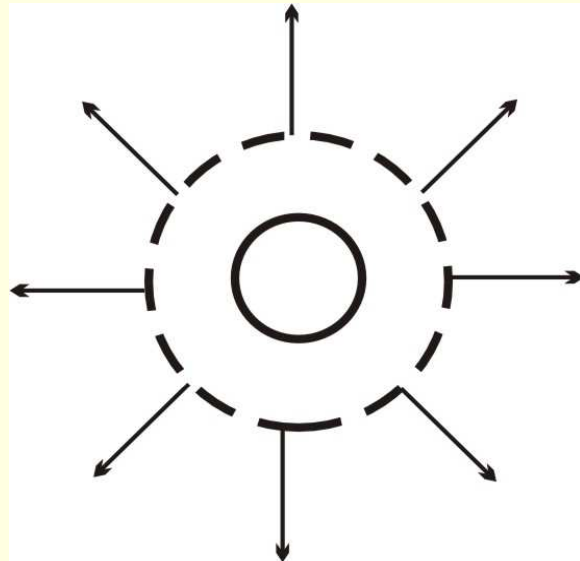


# Elementi elektroenergetskih sistema

- Proračun korone
- Gubici usled korone
  - Zamenska šema sa raspodeljenim parametrima
  - Zamenska šema sa koncentrisanim parametrima
- Konstanta prostiranja i karakteristična impedansa
  - Idealizovan vod (vod bez gubitaka)
- Karakteristični režimi nadzemnog voda sa raspodeljenim parametrima

## 2.4.5.2 Proračun korone



$$E = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot q \left[ \frac{C}{km} \right]}{r [cm]} \Rightarrow \left[ \frac{V}{cm} \right]; q = \frac{Q}{n}; E = \frac{18 \cdot 10^6}{r} \cdot \frac{Q}{n} = \frac{18 \cdot 10^6 \cdot C \cdot U / \sqrt{3}}{r \cdot n}$$

Da bi se sprečili negativni efekti korone, fazni provodnici se rade u obliku snopa.

## 2.4.5.2 Proračun korone

- I ako se zna da je kritično polje vazduha, pri lepom vremenu:  $E_{kr.vazduha} = 21.1 \left[ \frac{kV}{cm} \right]$ , dobija se kritična vrednost medjufaznog (linijskog) pri lepom vremenu, sa aspekta korone:

$$U_{kr.id} = \frac{36.54}{1 + \frac{r \cdot (n-1)}{R}} \cdot n \cdot r \cdot \ln \frac{D_{SGij} \cdot 2 \cdot h_{SG}}{r_{esc} \cdot D_{SGij'}} [kV]$$

- Izraz za  $U_{kr.id}$  važi za  $t = 25^{\circ}C$  i  $p = 1000mbar$

## 2.4.5.2 Proračun korone

- Stvarna vrednost kritičnog medjufaznog napona izračunava se uvažavanjem vremenskih prilika, hrapavosti provodnika, temperature i pritiska:

$$U_{kr} = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot U_{kr.id}$$

gde je  $m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 < 1$  , pa je  $U_{kr} < U_{kr.id}$

$m_1 = (0.3 \div 1)$  - koeficijent vremenskih uslova (kada je jednak jedinici, znači da je lepo vreme)

$m_2 = 0.8$  - koeficijent stanja površine provodnika

$m_3 = \frac{298 \cdot p(bar)}{273 + t[^\circ C]}$  - koeficijent temperature i vazdušnog pritiska

## 2.4.5.2 Proračun korone

- Snop smanjuje koronu, jer se povećava kritični napon korone.
- Ako se usvoji  $m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 = 0.77; n = 1$ , čiji je  $\frac{D_{SG}}{r} = 650$ , dobija se relacija:

$$U_{kr} [kV] = 180 \cdot r [cm] = 90 \cdot d [cm]$$

tj. mogu se izračunati minimalni presec i užadi, kojima se sprečava pojava korone (pri lepom vremenu, ako se ima jedan provodnik po fazi):

|           |       |       |      |      |      |      |
|-----------|-------|-------|------|------|------|------|
| Un [kV]   | 10    | 20    | 35   | 110  | 220  | 400  |
| Urm [kV]  | 12    | 24    | 38   | 123  | 245  | 420  |
| dmin [cm] | 0.133 | 0.267 | 0.42 | 1.36 | 2.72 | 4.66 |

## 2.4.5.3 Gubici usled korone

---

- Tabela pokazuje da se sa jednim užetom po fazi može ići do napona 220kV, počev od 400kV treba preći na provodnike u vidu snopa.
- Gubici usled korone: Postoji veliki broj empirijskih formula za aktivnu snagu podužnih gubitaka usled korone. Jedni obrasci za  $U < U_{kr}$  (zona malih gubitaka) i drugi za  $U > U_{kr}$  (zona velikih gubitaka).

## 2.4.5.3 Gubici usled korone

---

■  $P_{kor} = 3 \cdot g_{kor} \cdot U_g^2 = g_{kor} \cdot U^2$ , gde je

$P_{kor}$  -trofazna podužna snaga aktivnih gubitaka usled korone

$g_{kor}$  - aktivna podužna odvodnost usled korone

## 2.4.5.3 Gubici usled korone

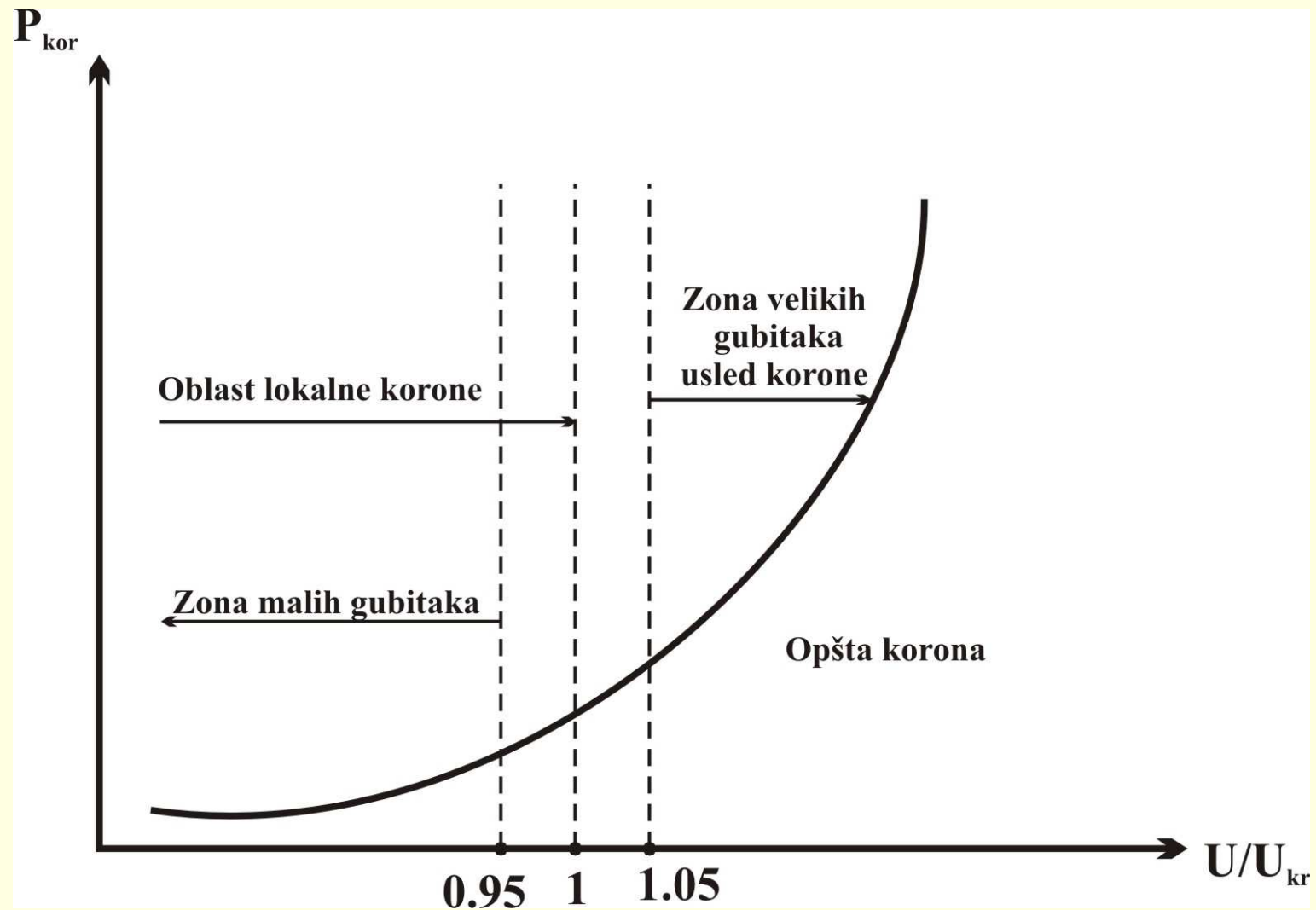
■ Za  $U < U_{kr}$

$$g_{kor} = 62.5 \cdot \left( \frac{U}{U_{kr}} \right)^5 \left[ \frac{nS}{km} \right] \left[ \frac{10^{-7} S}{100km} \right]$$

■ Za  $U > U_{kr}$

$$g_{kor} = 10^{-4} \cdot \left[ 1 - e^{-3.05 \cdot \left( \frac{U}{U_{kr}} - 1 \right)} \right] \left[ \frac{S}{100km} \right]$$

## 2.4.5.3 Gubici usled korone

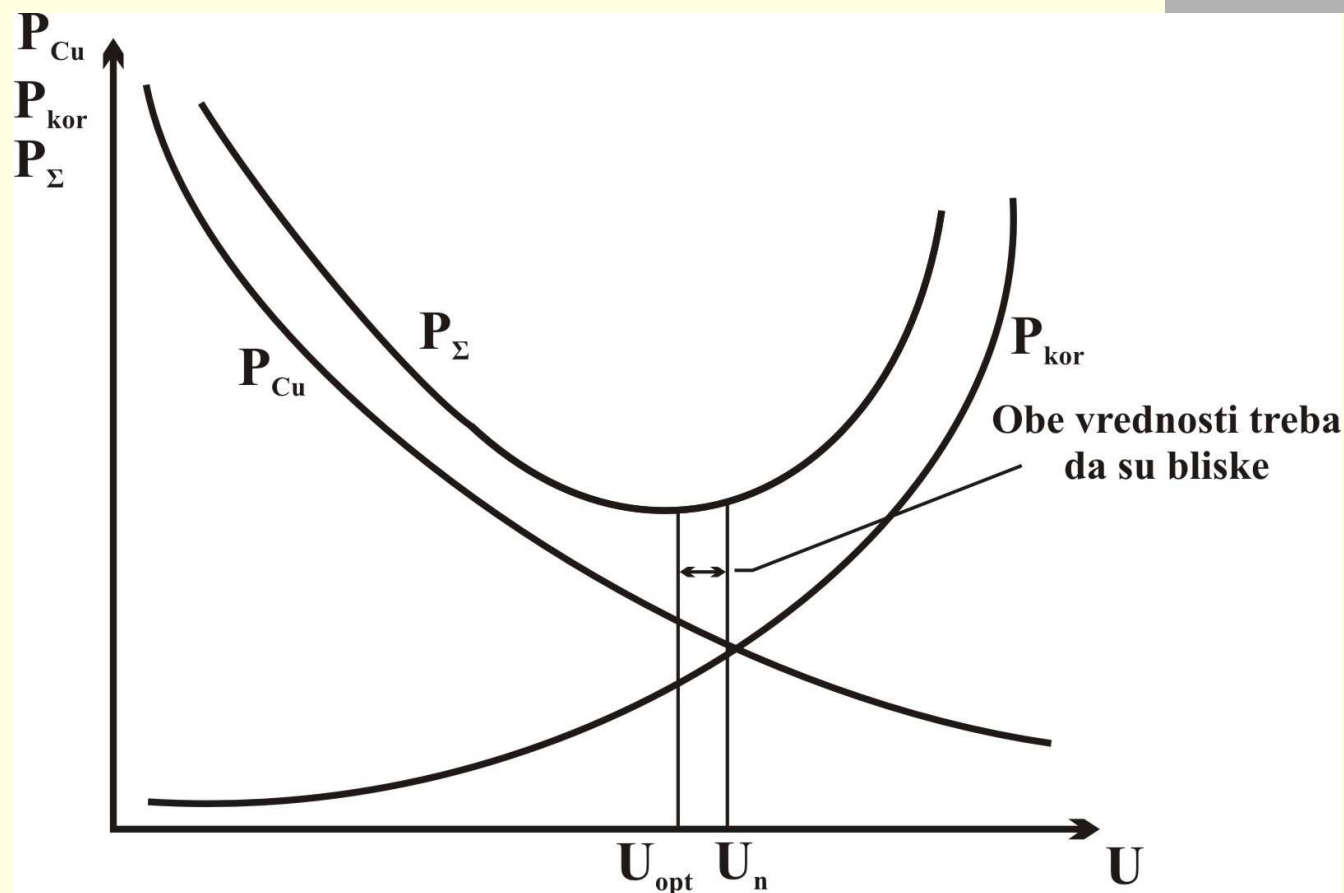


## 2.4.5.3 Gubici usled korone

- Obe formule su najmanje tačne kada je napon približno jednak kritičnom.
- Gubici usled korone se povećavaju sa povećanjem napona.
- Lokalna korona se javlja na vezivnim elementima

$\left( \frac{U}{U_{kr}} \leq 1 \right)$  , a opšta se javlja oko provodnika  $\left( \frac{U}{U_{kr}} > 1 \right)$

## 2.4.5.3 Gubici usled korone



$P_{Cu}$  – gubici u bakru  $\left(\sim \frac{1}{U}\right)$  ;  $P_{\Sigma}$  – ukupni gubici

## 2.4.5.3 Gubici usled korone

---

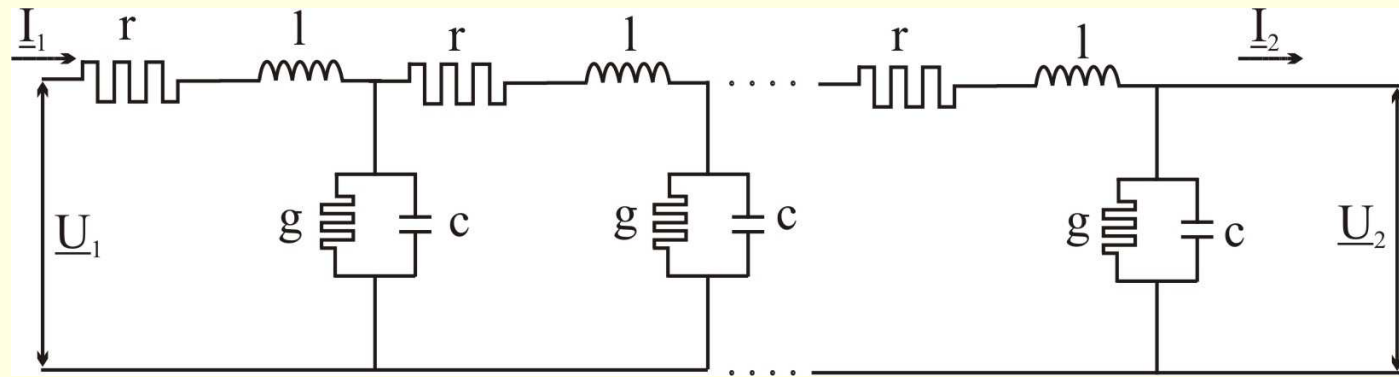
- Na slici je prikazana zavisnost gubitaka u provodnicima u prenosnoj mreži i gubitaka usled korone od napona. Vidi se da postoji optimalna vrednost napona, pri kome su ukupni gubici minimalni.
- Pored pozitivnog efekta koji snop ima na sprečavanje opšte korone, ima pozitivan efekat sa aspekta strujnog opterećenja (veća je površina za hladjenje).

## 2.5 Zamenske šeme voda

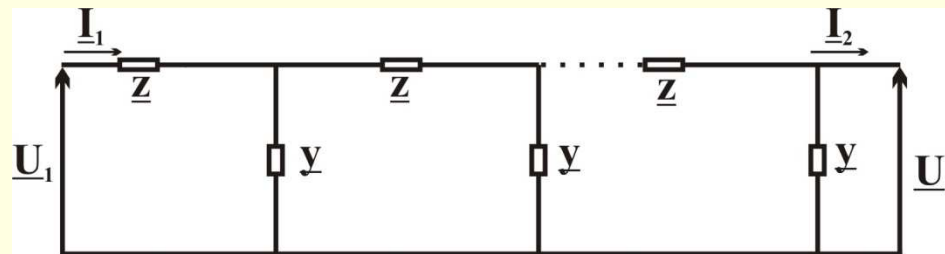
---

- Zamenska šema sa raspodeljenim parametrima
- Zamenska šema sa koncentrisanim parametrima
- Konstanta prostiranja i karakteristična impedansa nadzemnih vodova

## 2.5.1 Zamenska šema sa raspodeljenim parametrima



Gornja šema se može prikazati na sledeći način



Gde su:

$\underline{z} = r + jx = r + j\omega l$  - [Ω/km] - podužna impedansa

$\underline{y} = g + jb = g_l + g_{kor} + j\omega c$  - [S/km] - podužna admitansa

## 2.5.1 Zamenska šema sa raspodeljenim parametrima

---

Navedene veličine zavise od:

- $r$  (temperature)
- $g_{kor}$  ( $U$ , vremenski uslovi)
- $g_I$  (stanja površine izolatora)
- $c$  (visine nad zemljom, što zavisi od temperature)

## 2.5.1 Zamenska šema sa raspodeljenim parametrima

- Rastojanje  $x$  je od kraja voda, jer se tada dobijaju jednostavniji izrazi za konstante diferencijalnih jednačina.

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_2 \cdot ch(\underline{k} \cdot x) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_2 \cdot sh(\underline{k} \cdot x)$$

$$\underline{I}(x) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot sh(\underline{k} \cdot x) + \underline{I}_2 \cdot ch(\underline{k} \cdot x)$$

- Ove jednačine se još nazivaju **jednačine telegrafičara**, gde su:

$\underline{k}$  – konstanta prostiranja

$\underline{Z}_C$  – karakteristična impedansa

## 2.5.1 Zamenska šema sa raspodeljenim parametrima

---

■  $\underline{k} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} = \alpha + j\beta$ , gde su:

$\alpha$  – konstanta slabljenja

$\beta$  – fazna konstanta

$$\underline{Z}_C = \frac{\underline{z}}{\underline{k}} = \frac{\underline{z}}{\sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}}} = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}}$$

- Za  $x=L$ , (gde je  $L$  dužina voda), sledi  $\underline{U}(x) \rightarrow \underline{U}_1$  ,  
odnosno  $\underline{I}(x) \rightarrow \underline{I}_1$

## 2.5.1 Zamenska šema sa raspodeljenim parametrima

---

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot ch(\underline{k} \cdot L) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_2 \cdot sh(\underline{k} \cdot L)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot sh(\underline{k} \cdot L) + \underline{I}_2 \cdot ch(\underline{k} \cdot L)$$

Ovo su jednačine telegrafičara za  $x=L$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch(\underline{k} \cdot L) & \underline{Z}_C \cdot sh(\underline{k} \cdot L) \\ \frac{1}{\underline{Z}_C} \cdot sh(\underline{k} \cdot L) & ch(\underline{k} \cdot L) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$$

## 2.5.1.1 Konstanta prostiranja i karakteristična impedansa nadzemnih vodova

---

- Konstanta prostiranja trofaznih nadzemnih vodova je:

$$\underline{k} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} = \sqrt{(r + j\omega l) \cdot (g + j\omega c)}$$

- Uobičajeno je:  $g \ll \omega c$ , pa je

$$\underline{k} = \sqrt{(r + j\omega l) \cdot j\omega c} = \alpha + j\beta$$

$\alpha$  – konstanta slabljenja

$\beta$  – fazna konstanta

## 2.5.1.1 Konstanta prostiranja i karakteristična impedansa nadzemnih vodova

- Približne relacije:

$$\alpha = \frac{r}{2 \cdot \sqrt{\frac{l}{c}}} ; \beta = \omega \cdot \sqrt{l \cdot c} \cdot \left( 1 + \frac{r^2}{8 \cdot \omega^2 \cdot l^2} \right) = \beta_i \cdot \left( 1 + \frac{r^2}{8 \cdot \omega^2 \cdot l^2} \right)$$

- $\beta_i$  – fazna konstanta idealizovanog voda, tj. voda bez gubitaka aktivne snage ( $r=g=0$ )

$$\beta_i = \omega \cdot \sqrt{l \cdot c} = \frac{\omega}{V_0} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{V_0} = \frac{100 \cdot \pi \left[ \frac{rad}{s} \right]}{300000 \left[ \frac{km}{s} \right]} = 1.0472 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{rad}{km} \right] = 0.06 \left[ \frac{^\circ}{km} \right]$$

$$\beta_i = 6 \left[ \frac{^\circ}{100km} \right]$$

## 2.5.1.1 Konstanta prostiranja i karakteristična impedansa nadzemnih vodova

- Konstanta prostiranja ima dominantan imaginarni deo

$$\beta \approx 10 \cdot \alpha$$

- Karakteristična impedansa:  $\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}}$ , ako je

$$g \ll \omega c \Rightarrow Z_c = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{j\omega c}} = \sqrt{\frac{l}{c} \cdot \left(1 - j \cdot \frac{r}{\omega l}\right)} = Z_{ci} \cdot \sqrt{1 - \frac{jr}{\omega l}}$$

gde je:

$$\underline{Z}_{ci} = \sqrt{\frac{l}{c}} \text{ -karakteristična impedansa idealizovanog voda, tj voda bez gubitaka aktivne snage (r = g = 0).}$$

## 2.5.1.1 Konstanta prostiranja i karakteristična impedansa nadzemnih vodova

- Karakteristična impedansa je kompleksan broj sa dominantnim realnim delom. Definiše se i talasna dužina voda:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{\beta_i} = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{V_0}} = \frac{V_0}{f} = \frac{300000}{50} = 6000km$$

tj. posle 6000km, napon ima isti fazni stav kao na početku voda.

## 2.5.1.2 Idealizovan vod (vod bez gubitaka)

- Konstanta prostiranja:

$$\underline{k} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} = \sqrt{(r + j\omega l) \cdot (g + j\omega c)} = j \cdot \omega \cdot \sqrt{l \cdot c} = j \cdot \beta_i$$

gde je fazna konstanta:

$$\beta_i = \omega \cdot \sqrt{l \cdot c} = \frac{\omega}{V_0} = 6 \left[ \frac{\circ}{100km} \right] = 0.06 \left[ \frac{\circ}{km} \right]$$

kritična impedansa:

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} = \sqrt{\frac{l}{c}} = \underline{Z}_{ci}$$

## 2.5.1.2 Idealizovan vod (vod bez gubitaka)

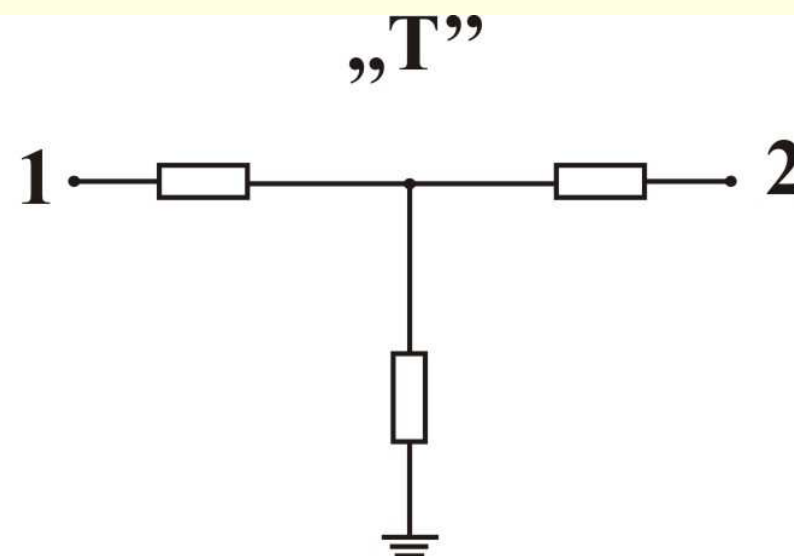
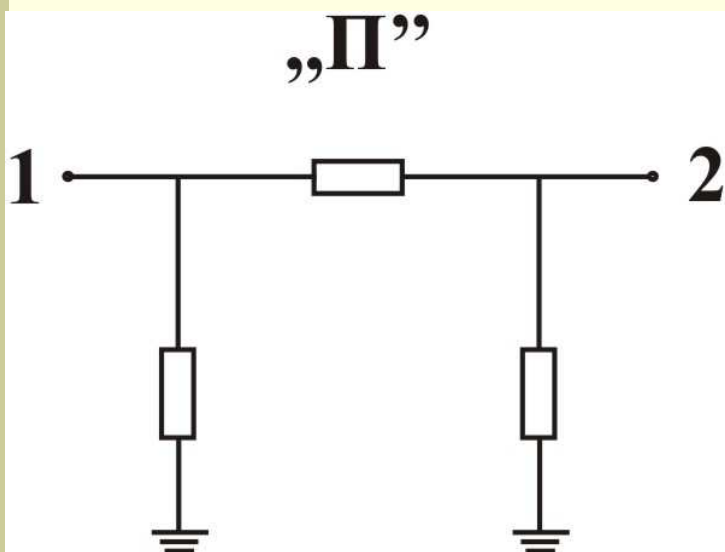
- Kod vodova bez gubitaka  $\underline{Z}_C$  je realan broj, a konstante prostiranja imaginarni broj. Kod idealizovanih vodova, proizvod konstante prostiranja i dužine, svodi se:  $\underline{k} \cdot x = j \cdot \beta_i \cdot x = j\lambda x$ , gde je:  
 $\lambda x = \beta_i \cdot x$ , električna ugaona dužina voda.
- Za ceo vod, dužine L, sledi:  $\lambda = \beta_i \cdot L$ , pa npr. za L=100km, električna ugaona dužina voda je:  
 $\lambda = \beta_i \cdot L = 0.06 \cdot 100 = 6^\circ$
- Hiperboličke f-je postaju trigonometrijske:  
 $sh(jx) = j \cdot \sin x$  ;  $ch(jx) = \cos x$

## 2.5.2 Ekvivalentiranje voda sa raspodeljenim parametrima, zamenskom šemom sa koncentrisanim parametrima

---

- Složene elektroenergetske mreže, sadrže veliki broj vodova, trafo stanica, generatora. U cilju pojednostavljenja proračuna, vodovi se ekvivalentiraju zamenskim „T” i „ $\pi$ ” šemama.
- Češća je primena „ $\pi$ ” šeme, jer se tako dobijaju mreže sa manjim brojem čvorova.

## 2.5.2 Ekvivalentiranje voda sa raspodeljenim parametrima, zamenskom šemom sa koncentrisanim parametrima

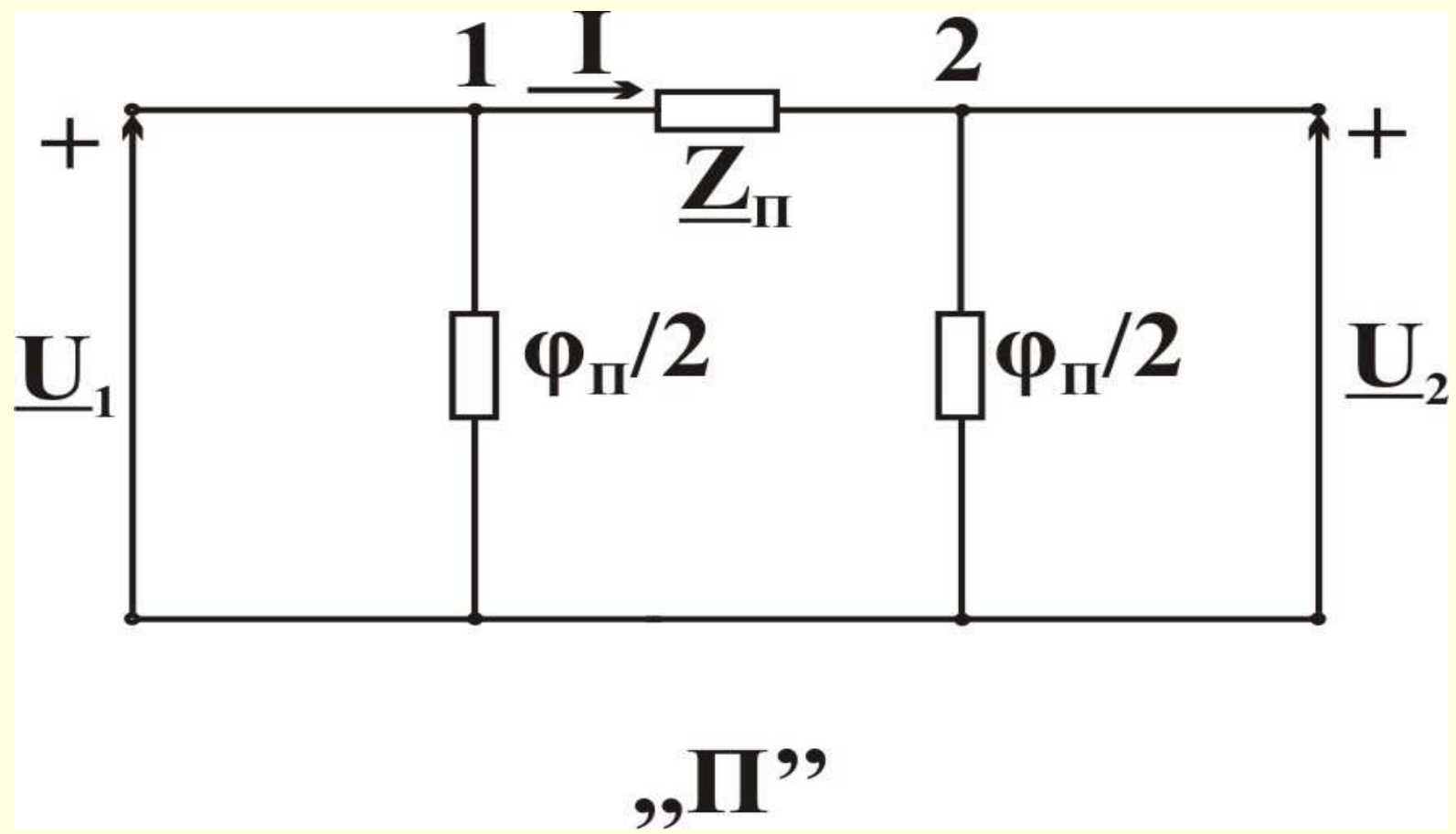


## 2.5.2 Ekvivalentiranje voda sa raspodeljenim parametrima, zamenskom šemom sa koncentrisanim parametrima

---

- Ekvivalentne šeme voda, sa koncentrisanim parametrima, ekvivalentne su sa šemom voda sa raspodeljenim parametrima, samo za režime na krajevima voda i pomoću njih nije moguće analizirati U i I duž voda.

## 2.5.2 Ekvivalentiranje voda sa raspodeljenim parametrima, zamenskom šemom sa koncentrisanim parametrima



## 2.5.2 Ekvivalentiranje voda sa raspodeljenim parametrima, zamenskom šemom sa koncentrisanim parametrima

---

- Keneljevi i Ridenbergovi sačinioci popravke, njihovim uvodjenjem se vod sa raspodeljenim parametrima, može predstaviti kao vod sa koncentrisanim parametrima.
- Za vod sa raspodeljenim parametrima, važi jednačina telegrafičara.
- Za vod sa koncentrisanim parametrima, koriste se jednačine po I i II Kirhofovom zakonu

## 2.5.2 Ekvivalentiranje voda sa raspodeljenim parametrima, zamenskom šemom sa koncentrisanim parametrima

- Radi jednostavnosti parametri ekvivalentne „Π” šeme odredjuju se iz proizvoda dužine voda, podužni parametri voda (  $\underline{z}$  i  $\underline{y}$  ) i odgovarajućih sačinioća popravke.

$$\underline{Z}_{\Pi} = \underline{k}_1 \cdot \underline{Z}_L$$

$$\underline{Y}_{\Pi} = \underline{k}_2 \cdot \underline{Y}_L$$

- $\underline{k}_1$  i  $\underline{k}_2$  se zovu Kenelijeve sačinioće popravke (kompleksni)

$$\underline{Z}_L = \underline{z} \cdot L$$

$$\underline{Y}_L = \underline{y} \cdot L$$

## 2.5.2 Ekvivalentiranje voda sa raspodeljenim parametrima, zamenskom šemom sa koncentrisanim parametrima

- Prvo izračunamo:

$$\underline{Z}_L = \underline{z} \cdot L$$

$$\underline{Y}_L = \underline{y} \cdot L \Rightarrow \underline{k}_1, \underline{k}_2$$

$$\underline{k}_1 = \frac{sh\sqrt{\underline{Z}_L \cdot \underline{Y}_L}}{\sqrt{\underline{Z}_L \cdot \underline{Y}_L}} \approx 1 + \frac{\underline{Z}_L \cdot \underline{Y}_L}{6}$$

$$\underline{k}_2 = \frac{2 \cdot (ch\sqrt{\underline{Z}_L \cdot \underline{Y}_L} - 1)}{\sqrt{\underline{Z}_L \cdot \underline{Y}_L} \cdot sh\sqrt{\underline{Z}_L \cdot \underline{Y}_L}} \approx \frac{1 + \frac{\sqrt{\underline{Z}_L \cdot \underline{Y}_L}}{12}}{1 + \frac{\underline{Z}_L \cdot \underline{Y}_L}{6}}$$

## 2.5.2 Ekvivalentiranje voda sa raspodeljenim parametrima, zamenskom šemom sa koncentrisanim parametrima

---

- Koeficijente popravke  $\underline{k}_1$  i  $\underline{k}_2$ , treba koristiti pri ekvivalentiranju dugih vodova.
- Ridenbergovi koeficijenti popravke
- Ovi koeficijenti popravke su skalarni (za razliku od Keneljevih, koji su kompleksni)

## 2.5.2 Ekvivalentiranje voda sa raspodeljenim parametrima, zamenskom šemom sa koncentrisanim parametrima

---

- Pre su bili definisani proizvodi dužina voda, podužni parametri:

$$\underline{Z}_L = \underline{z} \cdot L$$

$$\underline{Y}_L = \underline{y} \cdot L$$

- Sada to radimo skalarno:

$$R_L = r \cdot L$$

$$X_L = x \cdot L$$

$$C_L = c \cdot L$$

$$B_L = \omega \cdot C_L = b \cdot L$$

## 2.5.2 Ekvivalentiranje voda sa raspodeljenim parametrima, zamenskom šemom sa koncentrisanim parametrima

---

- Predpostavljeno je da je:  $g \ll \omega c$
- Ovde se definišu skalarni koeficijenti popravke:

$$R_{\Pi} = k_R \cdot R_L$$

$$X_{\Pi} = k_X \cdot X_L$$

- Poseban koeficijent popravke za  $R$ , a poseban za  $X$ , gde su:

$$k_R = 1 - \frac{1}{3} \cdot X_L \cdot B_L$$

$$k_X = 1 - \frac{1}{6} \cdot X_L \cdot B_L \cdot \left( 1 - \frac{R_L^2}{X_L^2} \right)$$

## 2.5.2 Ekvivalentiranje voda sa raspodeljenim parametrima, zamenskom šemom sa koncentrisanim parametrima

---

- $\underline{Y}_{\Pi} = jB_{\Pi}$ , ako zanemarimo  $g$ , ( $g \ll \omega c$ ),  $B_{\Pi} = k_B \cdot B_L$ ,

$$k_B = 1 + \frac{1}{12} \cdot X_L \cdot B_L$$

- Ridenbergove skalarne koeficijente popravke za dužine vodova do reda 200km, ne treba računati. Za izračunavanje parametara ekvivalentne „ $\Pi$ ” šeme, dovoljno je za vodove do 200km, koristiti proizvode dužine voda  $L$  i podužnih parametara  $(\underline{z}, \underline{y})$ .

## 2.5.3. Karakteristični režimi nadzemnog voda sa raspodeljenim parametrima

---

- Karakteristični režimi nadzemnog voda su:

### 1) Režim praznog hoda ( $I_2=0$ )

- Kod idealizovanog voda (bez gubitaka) je , što znači da su naponi u svim tačkama voda u praznom hodu u fazi i da je napon na kraju voda veći ili jednak naponu na početku voda. Ova pojava poznata je kao **FERANTIJEV EFEKAT**.

### 2) Režim prenosa prirodne snage

- Režim voda u kome je njegova krajnja tačka zatvorena karakterističnom impedansom naziva se režim prenosa prirodne snage.

## **2.5.3. Karakteristični režimi nadzemnog voda sa raspodeljenim parametrima**

---

### **3) Prenos aktivne snage idealizovanim vodom**

- Režim kada je vod zatvoren aktivnom otpornošću  $R$ .

### **4) Režim prenosa reaktivne snage**

- U ovom slučaju vod je zatvoren induktivnom ili kapacitivnom reaktansom.