



# Prenosové médiá 02

doc. Ing. Ľuboš Ovseník, PhD.

([lubos.ovsenik@tuke.sk](mailto:lubos.ovsenik@tuke.sk); tel. 421 55 602 4336)

[https://data.kemt.fei.tuke.sk/PM\\_PS\\_Prenosove\\_media/](https://data.kemt.fei.tuke.sk/PM_PS_Prenosove_media/)

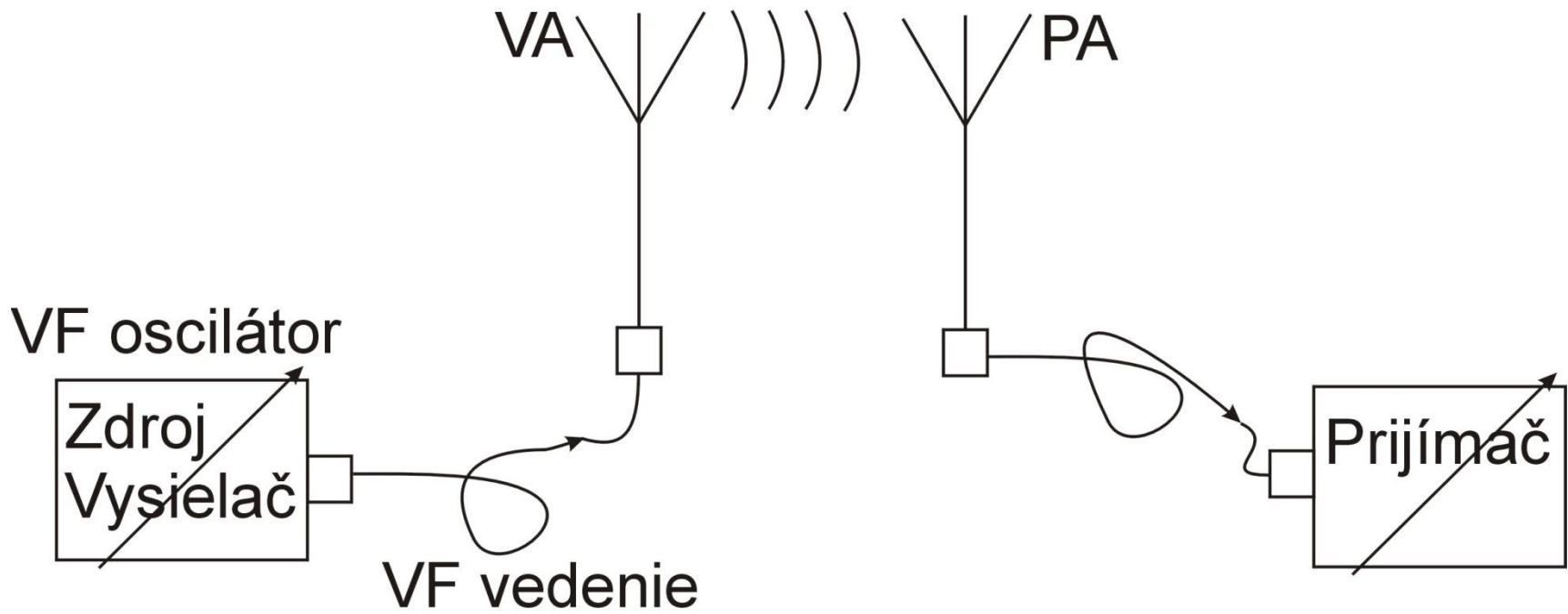
# PEVNÉ METALICKÉ PRENOSOVÉ MÉDIÁ 1

(ZÁKLADY ELEMENTÁRNEJ TEÓRIE VF VEDENÍ)

- Základné pojmy
- Vlastnosti vysokofrekvenčných vedení
  - Diferenciálne rovnice homogénneho vedenia
  - Postupujúca a odrazená vlna na vedení
  - Tlmenie a fázový posun
  - Vlnová impedancia bezstratového vedenia
  - Vstupná impedancia vedenia
  - Stojaté vlny na vedení
- Spôsobý zaťaženia vysokofrekvenčných vedení
  - Vedenie zaťažené impedanciou  $Z_k = Z_v$
  - Vedenie na konci nakrátko
  - Vedenie na konci naprázdno
  - Vedenie zaťažené impedanciou  $Z_k \neq Z_v$
  - Použitie rezonujúcich a nerezonujúcich vedení

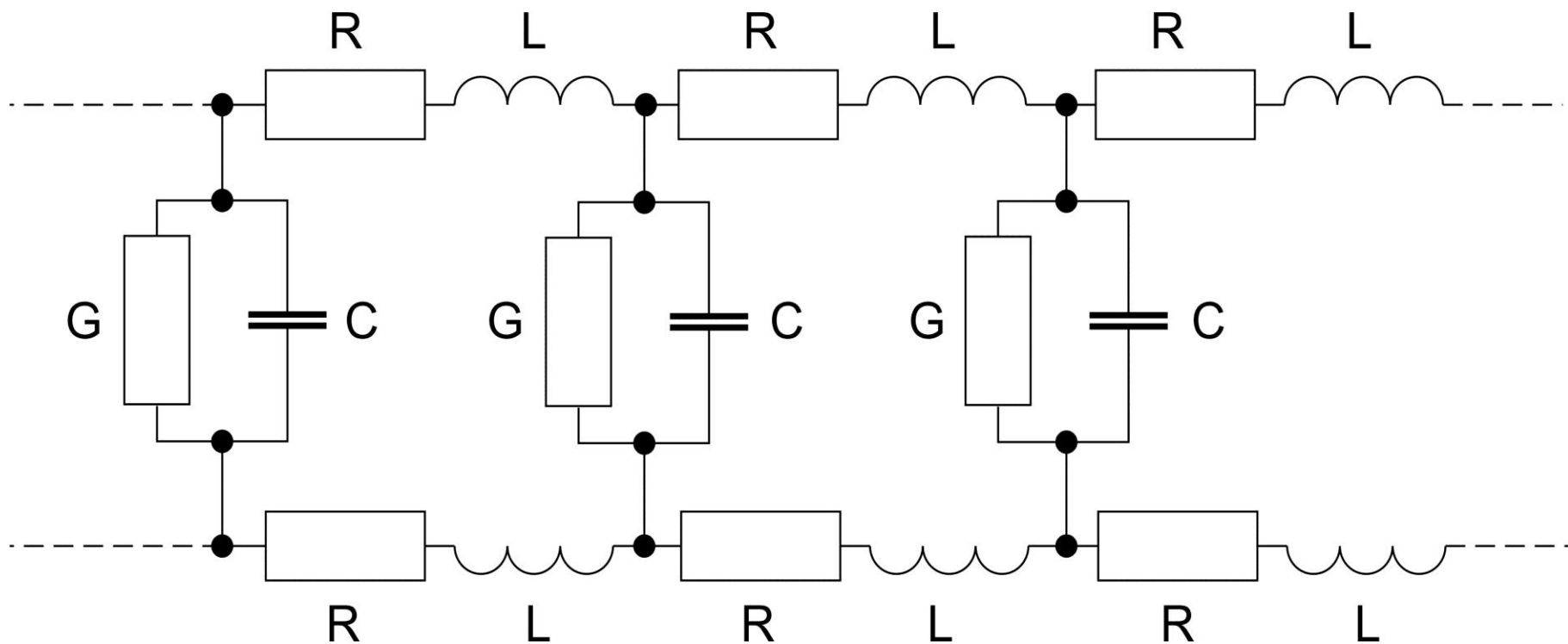
# Základné pojmy

- Vysokofrekvenčné (VF) vedenia sa používajú na prenos vysokofrekvenčnej energie zo zdroja do záťaže
- Úlohou VF vedenia je dopraviť túto energiu čo s najmenšími stratami

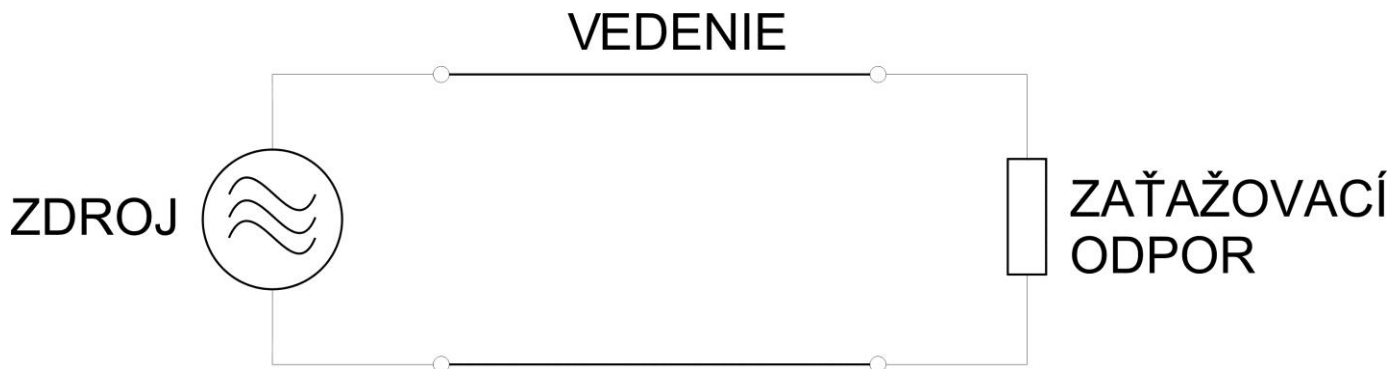


- **Základné veličiny** VF homogénneho vedenia sú (Obr. 1)
  - v pozdĺžnom smere - odpor (R) a indukčnosť (L)
  - v priečnom smere - vodivosť (G) a kapacita (C)
  
- Základnou vlastnosťou VF vedenia je, že jeho **elektrické parametre** (odpor, indukčnosť, vodivosť a kapacita) sú **rozložené pozdĺž celého vedenia** - **OBVODY S ROZLOŽENÝMI PARAMETRAMI**
  
- **Obvody s rozloženými parametrami** môžeme rozdeliť:
  - na obvody alebo vedenia s **rovnomerne** rozloženými parametrami (**homogénne**) (Obr. 1, Obr. 2, Obr. 3)
  - na obvody s **nerovnomerne** rozloženými parametrami (**nehomogénne**)

Obr. 1 Náhradná schéma homogénneho vedenia

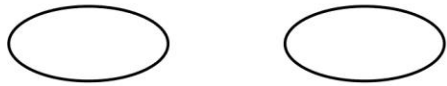


Obr. 2 Homogénne vedenie

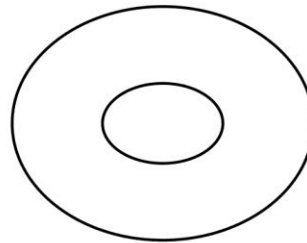


- **Homogénne vedenie** sa skladá
  - z **dvoch paralelných vodičov** pričom (Obr. 2)
    - prierez vodiča, vzdialenosť vodičov a izolačný materiál obklopujúci vodiče **má rovnaké hodnoty po celej dĺžke vedenia** (Obr. 3)
- **Hodnoty charakteristických veličín** pri určitej frekvencii sú dané
  - len **materiálom, rozmermi jednotlivých vodičov vedenia** a **vlastnosťami dielektrika**, v ktorom sú tieto uložené
  - **nezávisia od napätia a prúdu**, takže **vedenie je vlastne lineárny pasívny obvod!!!**

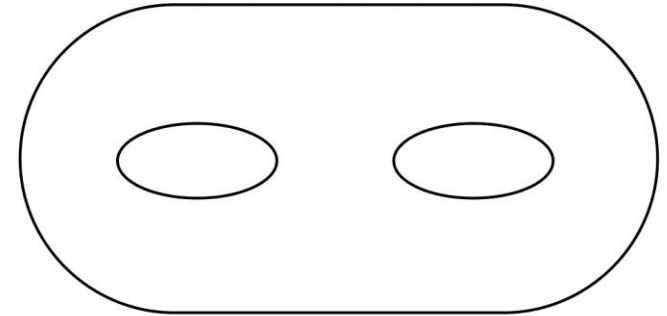
Obr. 3 Prierezové konfigurácie rôznych druhov homogénnych vedení



DVOJVODIČOVÉ  
VEDENIE



SÚOSOVÉ  
VEDENIE

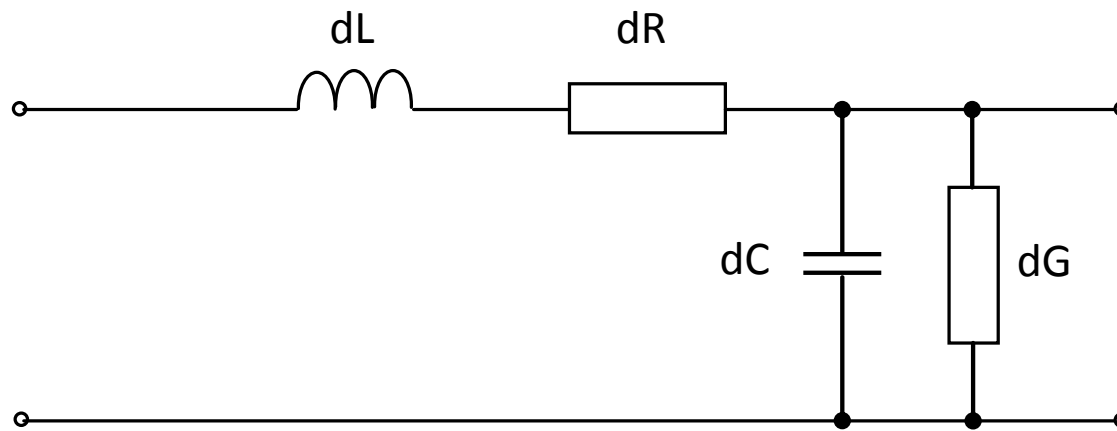


TIENENÉ DVOJVODIČOVÉ  
VEDENIE



PÁSIKOVÉ VODIČE

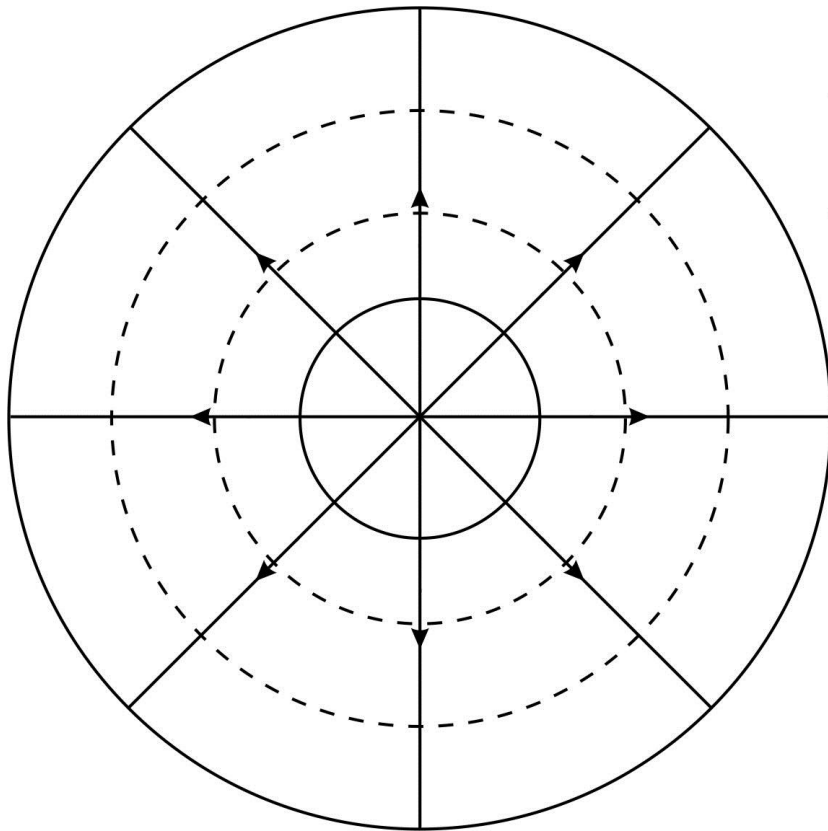
- **Prúdy vo vedení** vytvárajú magnetické pole okolo vodiča
  - mierou energie nazhromaždenej magnetickým poľom na jednotku dĺžky je **indukčnosť** na jednotku dĺžky
  - mierou strát, ktoré vznikajú vo vedení (pretekaním prúdu vo vodičoch) je **činný odpor** na jednotku dĺžky
  - mierou energie nazhromaždenej v elektrickom poli (rozdiel potenciálov medzi vodičmi vytvára elektrické pole) je **kapacita** v priečnom smere na jednotku dĺžky
  - mierou strát vzniknutých v izolante medzi dvoma vodičmi je **vodivosť** na jednotku dĺžky



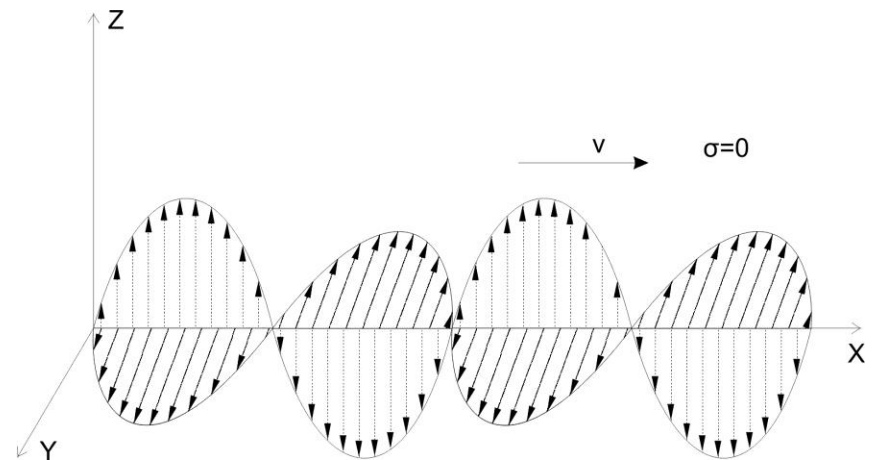


- Pretekánie prúdu vo vedení a vytváranie napätia je sprevádzané elm poľom
  - elektrické a magnetické pole pozdĺž vodiča je kolmé na vodič v celej jeho dĺžke (Obr. 4)
  - takéto pole sa nazýva **transverzálne elm pole** (TEM)
  - vlnenie sa šíri vedením od najnižších frekvencií, teoreticky od nuly
  - zvyšovaním frekvencie straty na vedení narastajú
  - v oblasti cm vln sa nepoužívajú dvojvodičové vedenia, ale vlnovody

Obr. 4 Transverzálne elektromagnetické vlnenie (TEM) v súosovom vedení



—— ELEKTRICKÉ POLE  
- - - - MAGNETICKÉ POLE



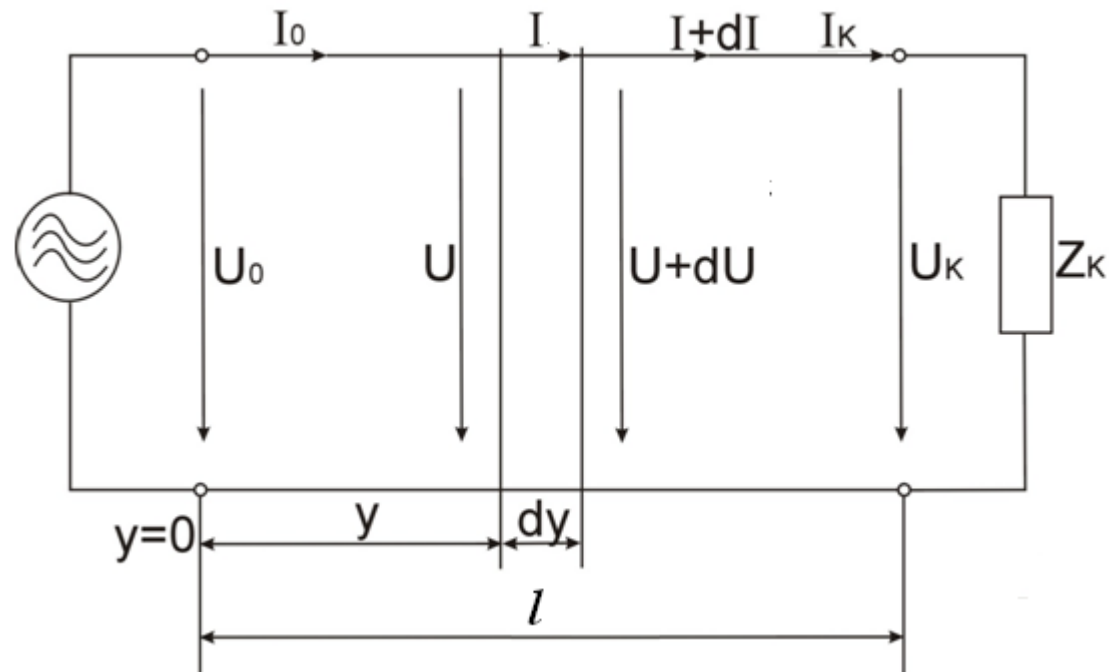
# Vlastnosti vysokofrekvenčných vedení

## DIFERENCIÁLNE ROVNICE HOMOGÉNNEHO VEDENIA

- Základné rovnice homogénneho vedenia vyjadrujú vzťah medzi prúdom a napätím pre úsek vedenia ( $dy$ )

$$\frac{dU}{dy} = -(R + j\omega L)I = -ZI$$

$$\frac{dI}{dy} = -(G + j\omega C)U = -YU$$



- Rovnica ( $dU/dy$ ) vyjadruje, že pomer zmeny vektora napätia pozdĺž vedenia **sa** v určitom mieste vedenia **rovná súčinu impedancie** na jednotku dĺžky a **vektora prúdu** v tomto mieste

$$\frac{dU}{dy} = -(R + j\omega L)I = -ZI$$

- Rovnica ( $dI/dy$ ) vyjadruje, že pomer zmeny vektora prúdu pozdĺž vedenia **sa** v určitom mieste vedenia **rovná súčinu admitancie** na jednotku dĺžky a **vektora napätia** v tomto mieste

$$\frac{dI}{dy} = -(G + j\omega C)U = -YU$$

- Riešením týchto diferenciálnych rovníc prvého rádu dostaneme **vzťah medzi** napätím ( $U_0$ ) a prúdom ( $I_0$ ) na **začiatku vedenia** a napätím ( $U$ ) a prúdom ( $I$ ) v **ľubovoľnom mieste** vedenia

$$U_{(y)} = \frac{U_0 + I_0 Z_v}{2} e^{-\gamma y} + \frac{U_0 - I_0 Z_v}{2} e^{+\gamma y}$$

$Z_v$  – Vlnová impedancia

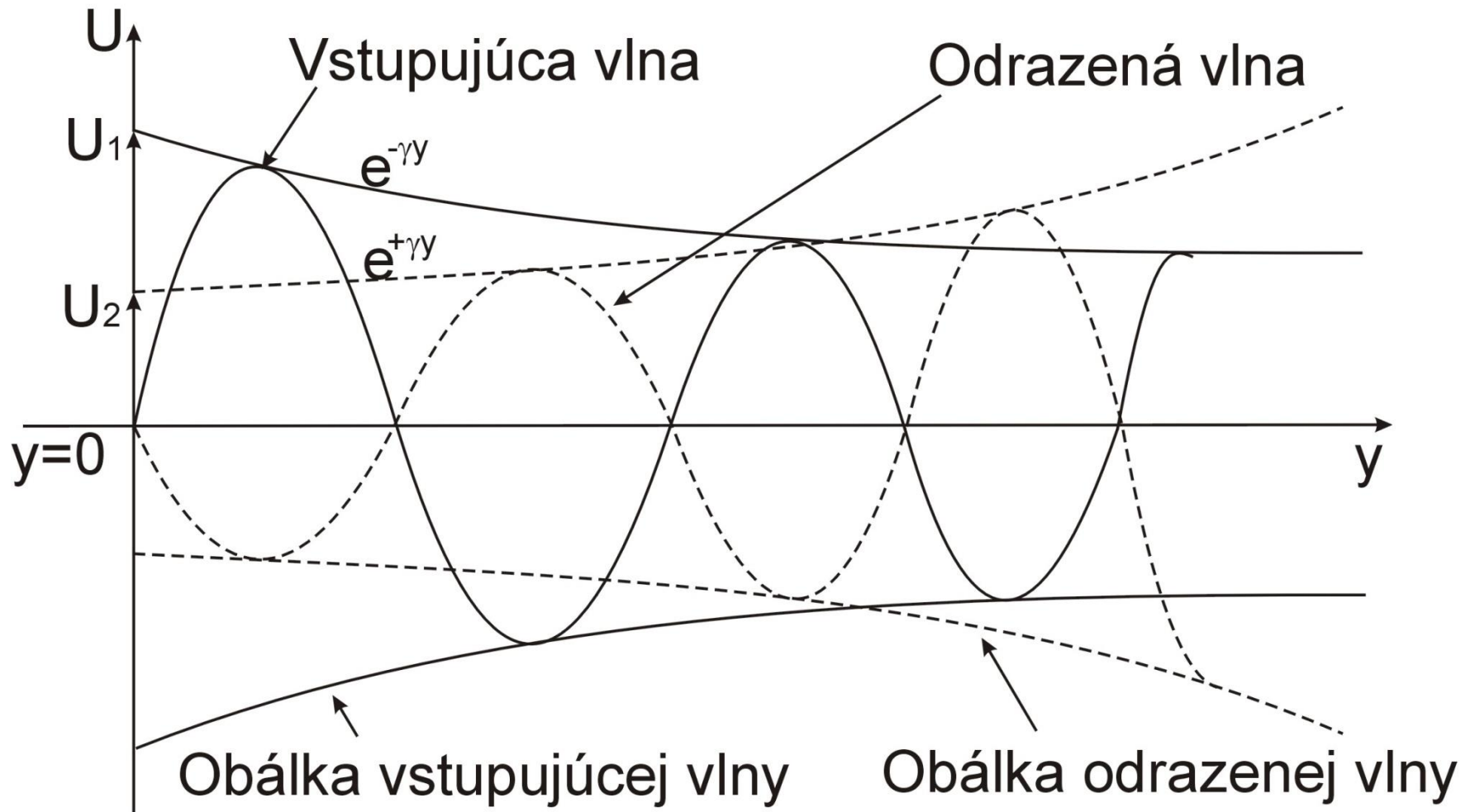
$$I_{(y)} = \frac{U_0 + I_0 Z_v}{2Z_v} e^{-\gamma y} - \frac{U_0 - I_0 Z_v}{2Z_v} e^{+\gamma y}$$

- Z týchto rovníc je zrejmé, že **vlna napätia a prúdu v ľubovoľnom mieste vedenia sa skladá** z dvoch častí
  - zo **vstupujúcej vlny** napätia, príp. prúdu
  - z **odrazenej vlny** napätia, príp. prúdu
    - členy pri výraze  $e^{-\gamma y}$  vyjadrujú veľkosť vstupujúcej vlny ( $U_1, I_1$ )
    - členy pri výraze  $e^{+\gamma y}$  vyjadrujú veľkosť odrazenej vlny napätia a prúdu ( $U_2, I_2$ )

$$U_{(y)} = U_1 e^{-\gamma y} + U_2 e^{+\gamma y} \quad I_{(y)} = I_1 e^{-\gamma y} - I_2 e^{+\gamma y}$$

- Výraz ( $U_1 e^{-\gamma y}$ ) reprezentuje
  - **vlnu harmonického napätia** s veľkosťou  $U_1$  v bode  $y = 0$ , ktorá postupuje v smere zväčšujúcej sa hodnoty  $y$  s fázovou rýchlosťou ( $v = \omega / \beta$ )
  - pričom **exponenciálne znižuje** svoju amplitúdu počas postupu podľa výrazu ( $e^{-\gamma y}$ )
  - $U_1$  je **amplitúda vstupujúcej vlny**, keď odchádza z bodu  $y=0$  (Obr. 5)

Obr. 5 Vstupující a odrazená vlna na vedení



- Výraz ( $U_2 e^{+\gamma y}$ ) reprezentuje
  - vlnu harmonického napätia s veľkosťou  $U_2$  v bode  $y = 0$ , ktorá postupuje v smere zmenšujúcej sa hodnoty  $y$  s fázovou rýchlosťou ( $v = \omega / \beta$ )
  - pričom exponenciálne zväčšuje svoju amplitúdu počas postupu podľa výrazu ( $e^{+\gamma y}$ )
  - $U_2$  je amplitúda odrazenej vlny, keď prichádza do  $y = 0$  (Obr. 5)
  
- Súčet ( $U_1 + U_2$ ) dáva napätie na vstupných svorkách vedenia
  
- Všetky úvahy, ktoré sa týkajú napäťovej vlny, platia aj pre prúdovú vlnu, lebo rovnica  $I(y)$  má presne ten istý tvar ako rovnica  $U(y)$
  
- Veličina  $\gamma$  udáva mieru šírenia vlny na homogénnom vedení

$$\gamma = \sqrt{xy} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

- Všeobecne v ustálenom stave signálu na vedení, ktorý sa harmonicky mení s časom, je miera šírenia ( $\gamma$ ) komplexná veličina

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

$\alpha$  je miera tlmenia

$\beta$  je miera fázového posunu homogénneho vedenia

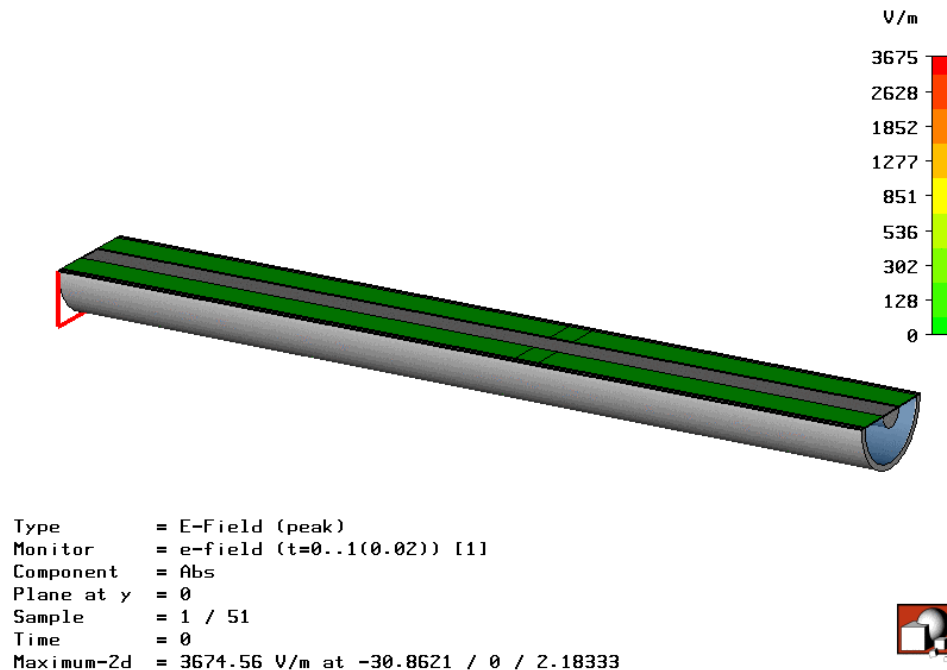
- Vlnová impedancia  $Z_v$

$$Z_v = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

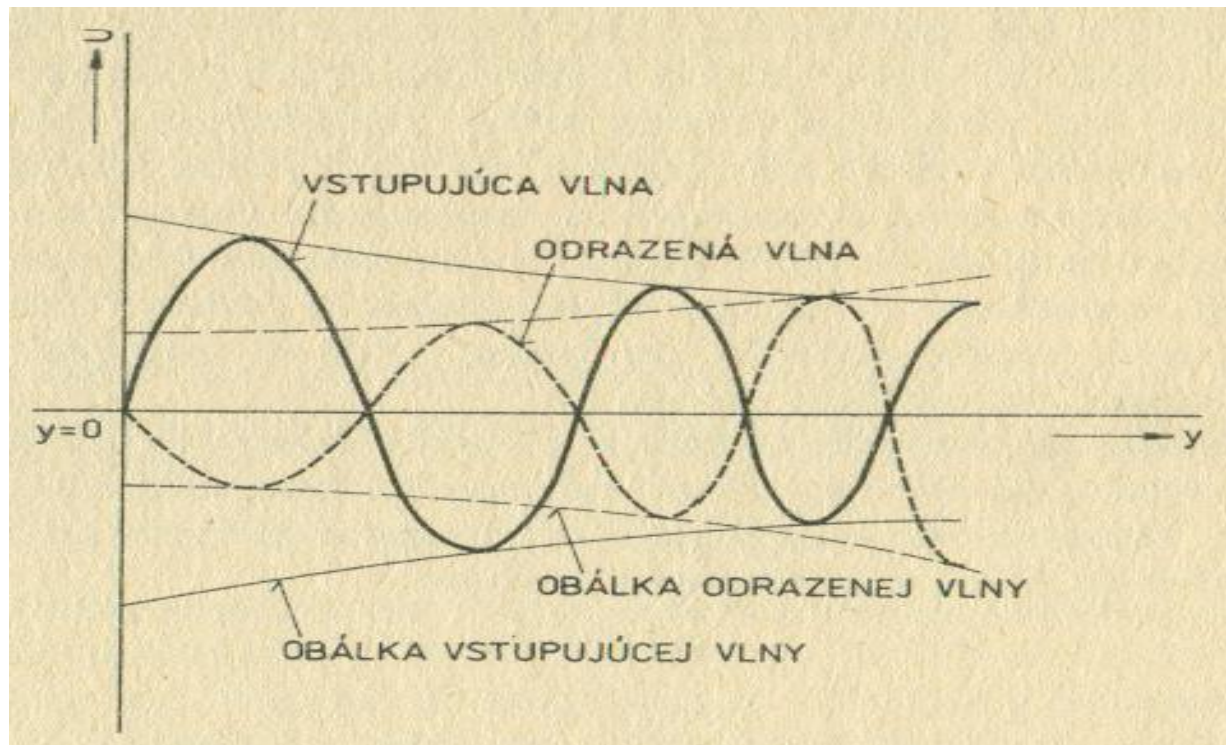


# POSTUPUJÚCA A ODRAZENÁ VLNA NA VEDENÍ

- Z uvedeného je zrejmé, že na vedení môže vzniknúť **napätová a prúdová vlna**, ktorá **postupuje v oboch smeroch vedenia** aj napriek tomu, že je pripojený len jeden zdroj signálu na vstupnej strane
- **Príčina je v odraze vlny od záťaže na konci vedenia**, čím vzniká jav veľmi podobný ako v prípade odrazu svetelnej vlny, akustickej vlny alebo v prípade odrazu vlny na vodnej hladine
- Ak **hociktorá z týchto vln narazí na prekážku**, odrazí sa úplne alebo čiastočne



- Ak na VF vedenie pripojíme zdroj signálu, **napätová a prúdová vlna začne postupovať** pozdĺž vedenia v smere narastajúcej hodnoty  **$y$**
- Ak postupujúca vlna dosiahne koniec vedenia a **zaťažovacia impedancia zapojená na svorkách nie je prispôbena** čo do veľkosti a fázy impedancii vedenia, vzniká na zaťažovacej impedancii **odrazená vlna** napätia a prúdu
- **Odrazená vlna postupuje** späť pozdĺž vedenia do bodu  **$y = 0$**  a môže sa odraziť od neprispôbenej impedancie zdroja  **$Z_i$**



■ Na vedení za určitých podmienok **môže existovať iba postupujúca vlna**

- ak je **vedenie nekonečne dlhé!!!???**
- ak je **vedenie zakončené vlnovou impedanciou  $Z_v$** 
  - v tomto prípade  $U_2 = 0, I_2 = 0$

$$U = U_1 e^{-\gamma x} \quad I = I_1 e^{-\gamma x}$$

**Základné diferenciálne rovnice homogénneho vedenia**

- To znamená, **že na vedení je len postupujúca vlna!!!**

# TLMENIE A FÁZOVÝ POSUN

- Napätiová a prúdová vlna na VF vedení je  $\gamma = \alpha + j\beta$   
tlmená vplyvom strát vedenia
  - priebeh tlmenia pozdĺž vedenia je charakterizovaný výrazom  $e^{-\alpha y}$ 
    - miera tlmenia ( $\alpha$ ) je vyjadrená v Np/m
    - celková veľkosť tlmenia  $\alpha y$  je daná dĺžkou vedenia ( $l$ )
  - špecifická miera tlmenia je pre určitý druh vedenia konštantná veličina, závisí však od frekvencie vlnenia
- Postupom harmonickej napätovej a prúdovej vlny po vedení v smere narastajúcej hodnoty  $y$  sa mení fázový posun medzi napätím a prúdom
  - zmena fázy pre vedenie je daná mierou fázového posunu ( $\beta$ ), ktorý sa vyjadruje v radiánoch na jednotku dĺžky (rad/m)
  - veľkosť fázy pozdĺž vedenia vyjadruje výraz  $e^{-j\beta y}$
  - pri harmonických priebehoch sa vzdialenosť ( $y$ ), na ktorej sa mení fáza o  $2\pi$  radiánov, nazýva vlnová dĺžka ( $\lambda$ )

$$2\pi = \beta\lambda$$

- Z výpočtu  $\beta$  (pre prenosové vedenie) vieme určiť fázové rýchlosti a vlnové dĺžky harmonicky sa meniaceho signálu napätia a prúdu pre akúkoľvek uhlovú frekvenciu  $\omega$  (rad/s)

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

- Pre harmonické vlnenie každého druhu je fázová rýchlosť

$$v_f = \frac{\omega}{\beta}$$

- Miera šírenia ( $\gamma$ ) je potom pre určitú uhlovú frekvenciu ( $\omega$ )

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

- je to zložité – zjednodušenie - berieme do úvahy bezstratové vedenie
  - predpokladáme, že  $R = 0$ ,  $G = 0$  - na vedení nedochádza k tlmeniu
  - k takým vedeniam sa približujú vedenia, ktoré pracujú na VVF

- VVF – veľmi vysoké frekvencie -  $\omega L$  a  $\omega C$  nadobúdajú také veľké hodnoty, že  $R$  a  $G$  môžeme s porovnaním s nimi zanedbať
- rýchlosť šírenia vlnenia po vedení je v tomto prípade blízka rýchlosti šírenia svetla
- po zanedbaní  $R$  a  $G$  je miera tlmenia ( $\alpha = 0$ ) a miera fázového posunu ( $\beta$ ) je

$$\beta \cong \omega \sqrt{LC}$$

## VLNOVÁ IMPEDANCIA BEZSTRATOVÉHO VEDENIA

- Bezstratové vedenie – energia mag. poľa v ľubovoľnom bode vedenia sa rovná energii el. poľa

$$\frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} CU^2$$

$L$  a  $C$  sú parametre vedenia

- Pomer  $U/I$  pri bezstratovom vedení nazývame vlnovou impedanciou vedenia ( $Z_v$ )

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- Vlnová impedancia ( $Z_v$ ) VF vedenia je veľmi dôležitá a reálna fyzikálna veličina, **nemožno ju priamo odmerať** impedančným mostíkom na určitej dĺžke vedenia
  
- **Môžeme ju vypočítať**
  - z **rozložených parametrov** vedenia L a C pre ľubovoľnú frekvenciu
  - alebo z **daných rozmerov** a **materiálových vlastností** vedenia
  
- Komerčne vyrábané vedenia majú určité **definované hodnoty vlnovej impedancie**, ako napr. 70  $\Omega$ , 300  $\Omega$  a pod.

# VSTUPNÁ IMPEDANCIA VEDENIA

- Rovnice pre **výpočet vstupnej impedancie** bezstratového vedenia

$$U_0 = U_k \cos hj\beta l + Z_v I_k \sin hj\beta l$$

$$I_0 = I_k \cos hj\beta l + j \frac{U_k}{Z_v} \sin hj\beta l$$

$$Z_{vst} = \frac{U_0}{I_0} = Z_v \frac{Z_k \cos \beta l + jZ_v \sin \beta l}{Z_v \cos \beta l + jZ_k \sin \beta l}$$

$l$  – dĺžka vedenia

$h$  – koef. hyperbol. funkcie

$U_0, I_0$  – začiatok vedenia

$U_k, I_k$  – koniec vedenia

$Z_v$  – char. impedancia

$Z_k$  – zaťažovacia impedancia

- Vstupnú impedanciu vedenia v podstatnej miere ovplyvňuje **charakteristická impedancia**  $Z_v$  a **zaťažovacia impedancia**  $Z_k$



# STOJATÉ VLNY NA VEDENÍ

- Pripojme na koniec vedenia spotrebič, ktorého **impedancia**  $Z_k$  sa **blíži** k vlnovej **impedancii**  $Z_v$ , potom na vedení vznikne
  - **priama vlna** (vstupujúca)  $U_{kvs}$
  - **odrazená vlna**  $U_{kod}$
- **Neprispôsobenosť** záťaže  $Z_k$  k charakteristickej impedancii vlnenia  $Z_v$  má za následok, že **časť** vysokofrekvenčnej **energie sa vracia** odrazenou vlnou
- **Činiteľ odrazu** - **pomer** odrazenej vlny ku vstupujúcej vlne napätia a prúdu na konci vedenia (**reflexný činiteľ**)

$$r = \frac{U_{kod}}{U_{kvs}} = -\frac{I_{kod}}{I_{kvs}}$$

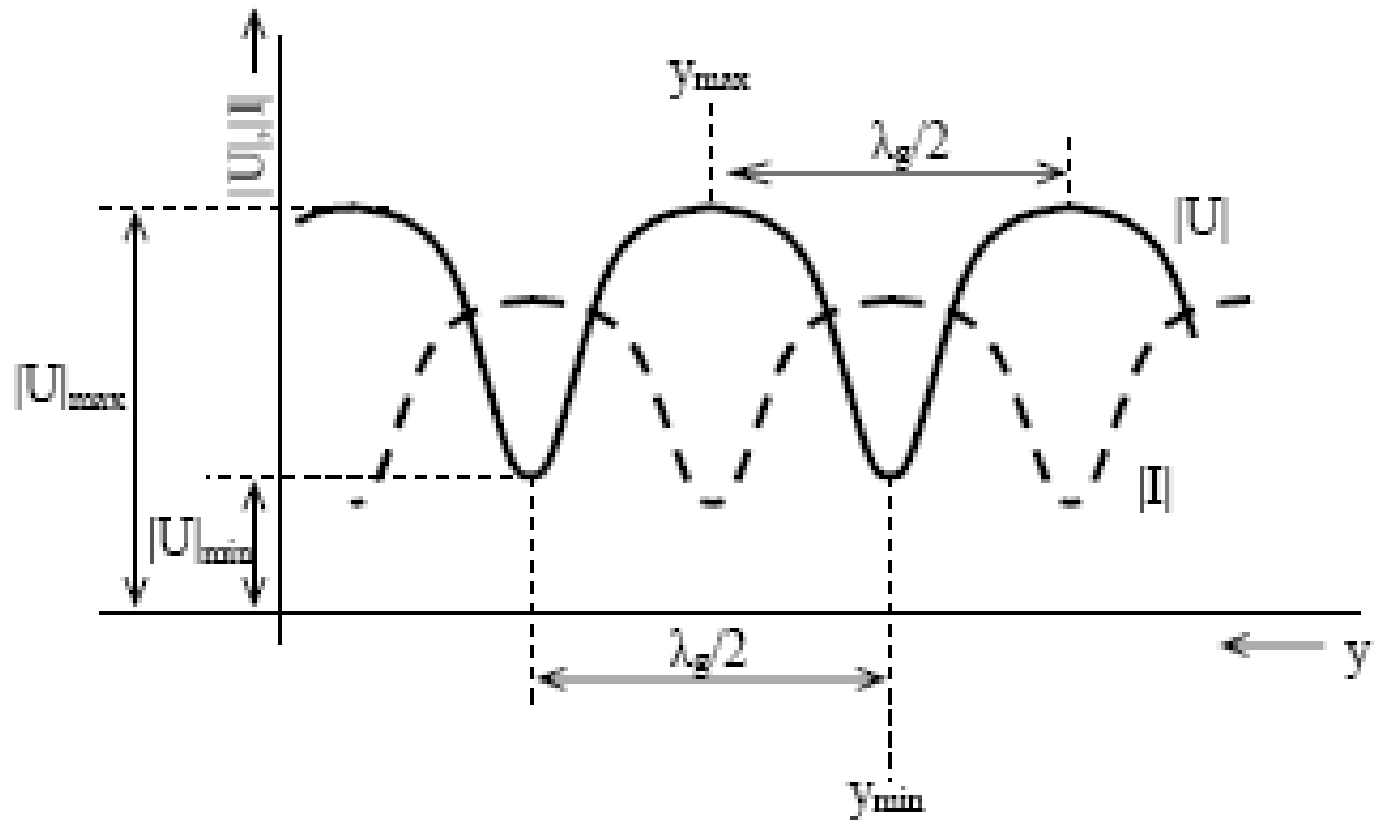
$$Z_v = \frac{U_{kvs}}{I_{kvs}} \quad Z_k = \frac{U_k}{I_k} = Z_v \frac{1+r}{1-r} \quad r = \frac{Z_k - Z_v}{Z_k + Z_v}$$

- Pomer ( $Z_k/Z_v$ ) sa nazýva **pomernou (normalizovanou) impedanciou**  $Z_n$

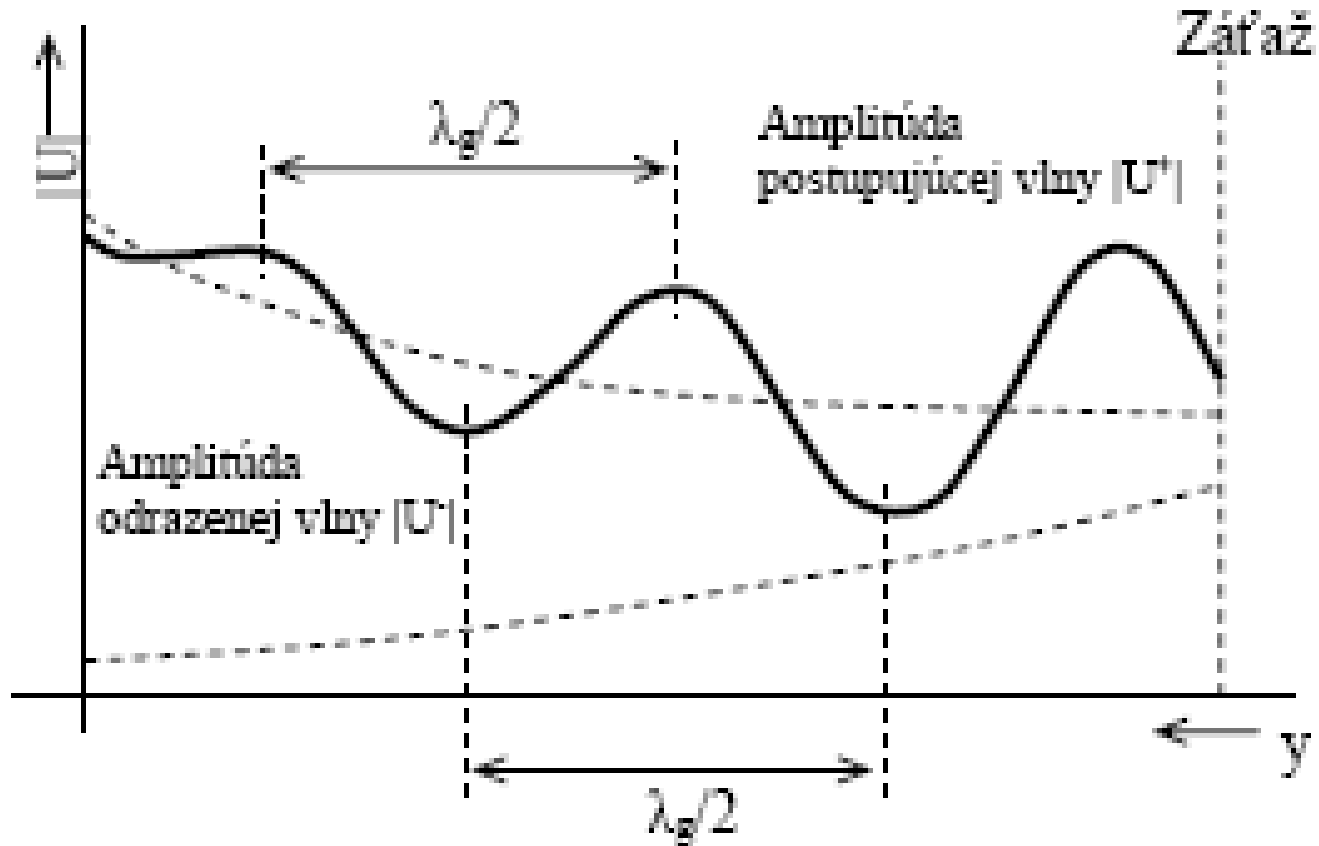
$$r = \frac{\frac{Z_k}{Z_v} - 1}{\frac{Z_k}{Z_v} + 1} = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1}$$

- **Činiteľ odrazu** je jednoznačne určený **pomerom** zaťažovacej impedancie  $Z_k$  a vlnovej impedancie  $Z_v$
- Extrémne hodnoty dosiahne činiteľ odrazu prípadoch, keď
  - $Z_v = Z_k$  -  $r = 0$  (vedenie **prispôbené**)
  - $Z_k = 0$  -  $r = -1$  (vedenie na konci **nakrátko**)
  - $Z_k = \infty$  -  $r = 1$  (vedenie na konci **naprázdno**)
- Na **nepripôsobenom vedení vzniká** interferenciou (skladaním) priamej a odrazenej vlny **stojatá vlna**
- Priebeh stojatej vlny má pozdĺž vedenia minimá a maximá s **rozdielom tým menším**, čím viac sa blíži  $Z_k$  ku  $Z_v$

# Obr. Stojaté vlny na vedení bez strát



Obr. Stojaté vlny na vedení so stratami



- Vznikom **stojatého vlnenia** (následkom neprispôsobenia) **klesá prenos** VF energie do záťaže
- Pracovné podmienky prenosu energie môžeme vyjadriť **pomerom stojatých vln (PSV)** napätia alebo prúdu (maximálnej a minimálnej hodnoty)

$$PSV = \left| \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \right| = \left| \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \right|$$

- **PSV je číslo** vždy väčšie ako jedna, v ideálnom prípade môže sa rovnať jednej
- **Extrémne hodnoty PSV sú:**
  - $U_{\max} = U_{\min}$  - **PSV = 1** (dokonalé **prispôsobenie**)
  - $U_{\min} = 0$  - **PSV =  $\infty$**  (vedenie **naprázdno, nakrátko**)
- V praktických aplikáciách sa snažíme navrhnuť a **udržať v prevádzke** VF vedenie **v prispôsobenom** stave - **nereálne**
- Pri VF vedeniach televíznych vysielačích antén - **PSV < 2**
- **Odrazy na vedení** - znižujú prenášaný výkon a majú rušivé účinky

# Spôsoby zaťaženia vysokofrekvenčných vedení

- Z hľadiska veľkosti zaťažovacej impedancie  $Z_k$ , môžeme rozlíšiť štyri dôležité prípady ukončenia VF vedenia:
  - vedenie zaťažené impedanciou  $Z_k$ , ktorá sa rovná jeho vlnovej  $Z_v$  ( $Z_k = Z_v$ ) – **prispôbené**
  - vedenie na konci spojené do skratu ( $Z_k = 0$ ) – **nakrátko**
  - vedenie na konci otvorené ( $Z_k = \infty$ ) – **naprázdno**
  - vedenie zaťažené impedanciou  $Z_k$ , ktorá sa nerovná (je väčšia alebo menšia) jeho vlnovej  $Z_v$  ( $Z_k \neq Z_v$ )

## VEDENIE ZAŤAŽENÉ IMPEDANCIOU $Z_k = Z_v$ (Impedančné prispôbenie)

- Celá VF energia sa odovzdá do zaťažovacej impedancie  $Z_k$
- Na konci vedenia nenastáva žiadny odraz – činiteľ odrazu  $r = 0$ , t.j. vedenie je prispôbené záťaži

- **Vstupná impedancia** vedenia

$$Z_{vst} = Z_v$$

- Pre **bezstratové vedenie** ( $\alpha = 0$ )

- **okamžité hodnoty** napätia a prúdu na ktoromkoľvek mieste na vedení možno vyjadriť v tvare (pri harmonickej zmene  $U_0$  a  $I_0$  s frekvenciou  $\omega$ )

$$U = U_0 e^{-j(\omega t + \beta y)} \quad I = I_0 e^{-j(\omega t + \beta y)}$$

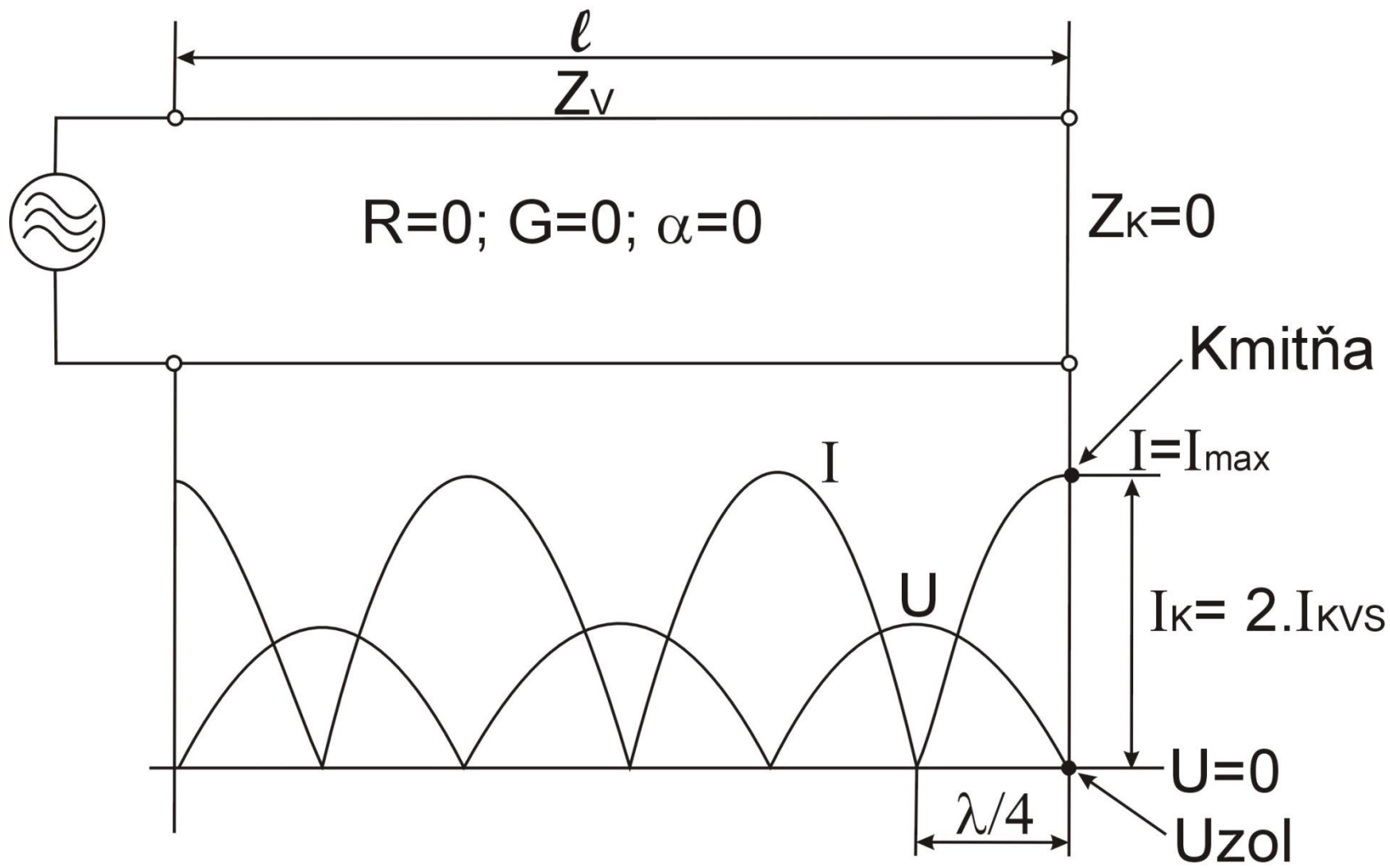
- **Napätie** a **prúd** sa teda na vedení **mení harmonicky** v čase a pozdĺž vedenia
- Takéto vlnenie nazývame **postupným vlnením!**

# VEDENIE NA KONCI NAKRÁTKO

- Vedenie na konci spojené **nakrátko** -  $Z_k = 0$  (skrat) (Obr. 6)
- **Priama vlna** napätia a prúdu, ktorá postupuje od zdroja na koniec vedenia, **sa odráža a vracia späť** ku zdroju
- Na vedení vznikne **stojatá vlna** prúdu a napätia - vedením sa **neprenáša žiaden činný výkon**
- Na konci vedenia je
  - **uzol napäťovej stojatej vlny** ( $U=0$ )
  - **kmitňa prúdovej stojatej vlny** ( $I=I_{\max}$ )
- Vlna napätia a prúdu je **posunutá o  $\lambda/4$**
- Uzatvoreným obvodom tečie prúd
  - **vlna prúdu** v mieste skratu **fázu nemení**
  - odrazená **vlna napätia** v mieste nulovej záťaže **mení fázu** proti priamej vlne o  $180^\circ$
- Pretože na konci vedenia nastáva úplný odraz
  - **činiteľ odrazu**  $r = -1$
  - **pomer stojatých vln**  $PSV = \infty$



Obr. 6 Vedenie nakrátko



■ **Odrazená** vlna prúdu

- sa **sčítava** s priamou vlnou prúdu v miestach s rovnakou fázou
- sa **odčítava** v bodoch vzdialených o  $1/4$  vlny

■ **Maximá** stojatej prúdovej vlny sú

$$I_k = 2I_{kvs}$$

■ **Minimá** stojatej prúdovej vlny sú **nulové** (Obr. 6)

■ **Vstupná impedancia** vedenia nakrátko ( $Z_k = 0$ )  $Z_{vst} = jZ_v \operatorname{tg} \beta l$

- vedenie nakrátko sa chová ako **premenlivá reaktancia**
- jej **charakter závisí** od veľkosti argumentu ( $\beta l$ ) – dĺžky vedenia
  - $Z_{vst}$  bude mať **induktívny charakter** ak  **$\operatorname{tg} \beta l > 0$**

$$2n \frac{\lambda}{4} < l < (2n+1) \frac{\lambda}{4}; n = 0, 1, 2, \dots$$

- $Z_{vst}$  bude mať **kapacitný charakter** ak  **$\operatorname{tg} \beta l < 0$**  (Obr. 7)

$$(2n-1) \frac{\lambda}{4} < l < (2n) \frac{\lambda}{4}; n = 1, 2, 3, \dots$$

- vstupná impedancia je nulová ( $Z_{\text{vst}} = 0$ ) ak

$$l = 2n \frac{\lambda}{4}$$

- pri takejto dĺžke „ $l$ “ sa vedenie správa ako **sériový rezonančný obvod** (SRO)

- vstupná impedancia je nekonečne veľká ( $Z_{\text{vst}} = \infty$ ) ak

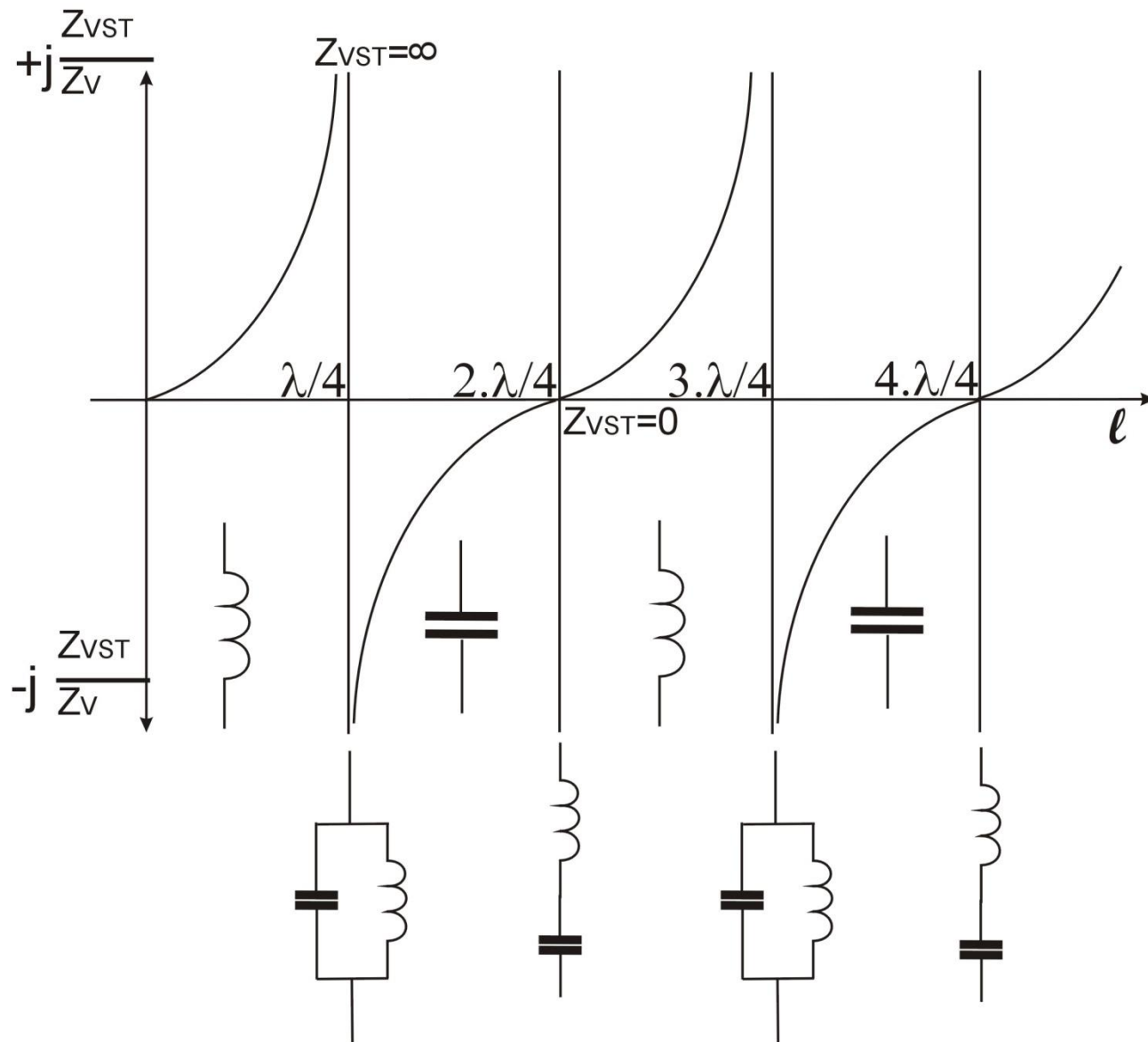
$$l = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}$$

- pri takejto dĺžke „ $l$ “ sa vedenie správa ako **paralelný rezonančný obvod** (PRO)

### ■ Vedenie nakrátko sa správa

- ako **sériový rezonančný obvod**, keď jeho dĺžka sa rovná **párnemu násobku štvrtín**
- ako **paralelný rezonančný obvod**, keď jeho dĺžka sa rovná **nepárnemu násobku štvrtín** (Obr.5.7)

Obr. 7 Priebeh charakteru vstupnej impedancie vedenia nakrátko



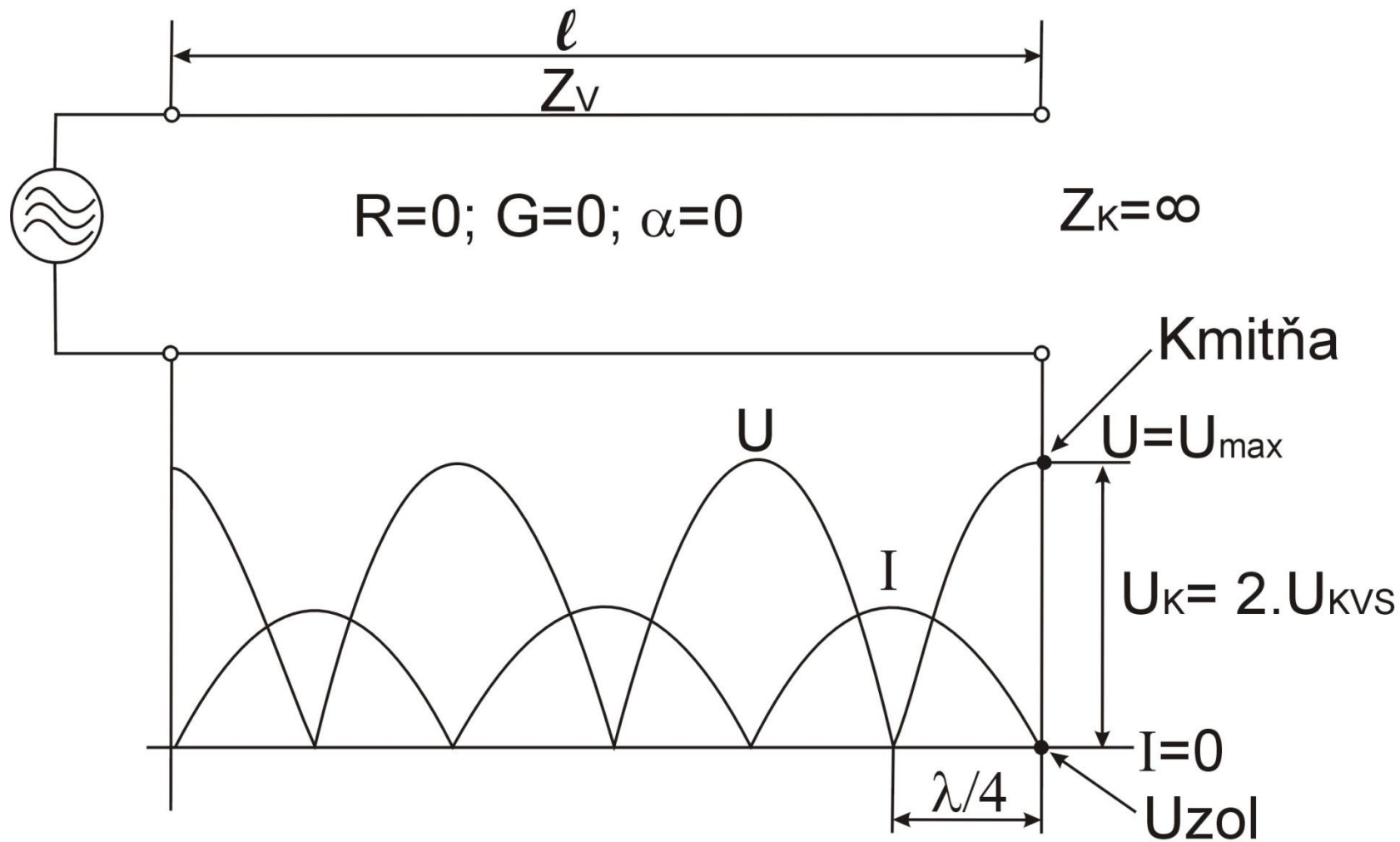
# VEDENIE NA KONCI NAPRÁZDNO

- Vedenie na konci spojené **naprázdno** -  $Z_k = \infty$  (otvorené) (Obr. 8)
- Ak pripojíme vedenie na zdroj striedavého prúdu, na vedení vznikne stojaté vlnenie pričom na konci vedenia je
  - **kmitňa** napäťovej vlny ( $U = U_{\max}$ )
  - **uzol** prúdovej vlny ( $I = 0$ )
- Maximá alebo minimá sú **navzájom posunuté  $\lambda/4$**
- Pretože na konci vedenia nastáva úplný odraz
  - činiteľ odrazu  $r = 1$
  - pomer stojatých vln  $PSV = \infty$
- Na otvorenom konci vedenia má prúd nulovú hodnotu – **zaniká mag. pole**
  - tento stav spôsobí vzrast napätia na dvojnásobok
  - **maximum** napäťovej vlny je

$$U_k = 2U_{kvs}$$

- **minimum** napäťovej vlny je nulové

Obr. 8 Vedenie naprázdno



- **Odrazy vln:**
  - napätie sa odráža vo fáze
  - prúd v proti fáze
- **Vstupná impedancia** vedenia naprázdno ( $Z_k = \infty$ )

$$Z_{vst} = -jZ_v \cotg \beta l$$

- vedenie nakrátko sa chová ako obvod s premenlivou reaktanciou
- jej charakter závisí od veľkosti argumentu ( $\beta l$ ) – dĺžky vedenia
  - $Z_{vst}$  bude mať **induktívny** charakter ak  **$\cotg \beta l > 0$**

$$(2n-1)\frac{\lambda}{4} < l < 2n\frac{\lambda}{4}; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- $Z_{vst}$  bude mať **kapacitný** charakter ak  **$\cotg \beta l < 0$**

$$2n\frac{\lambda}{4} < l < (2n+1)\frac{\lambda}{4}; \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

(Obr. 9)

- vstupná impedancia je nulová ( $Z_{\text{vst}} = 0$ ) ak

$$l = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}$$

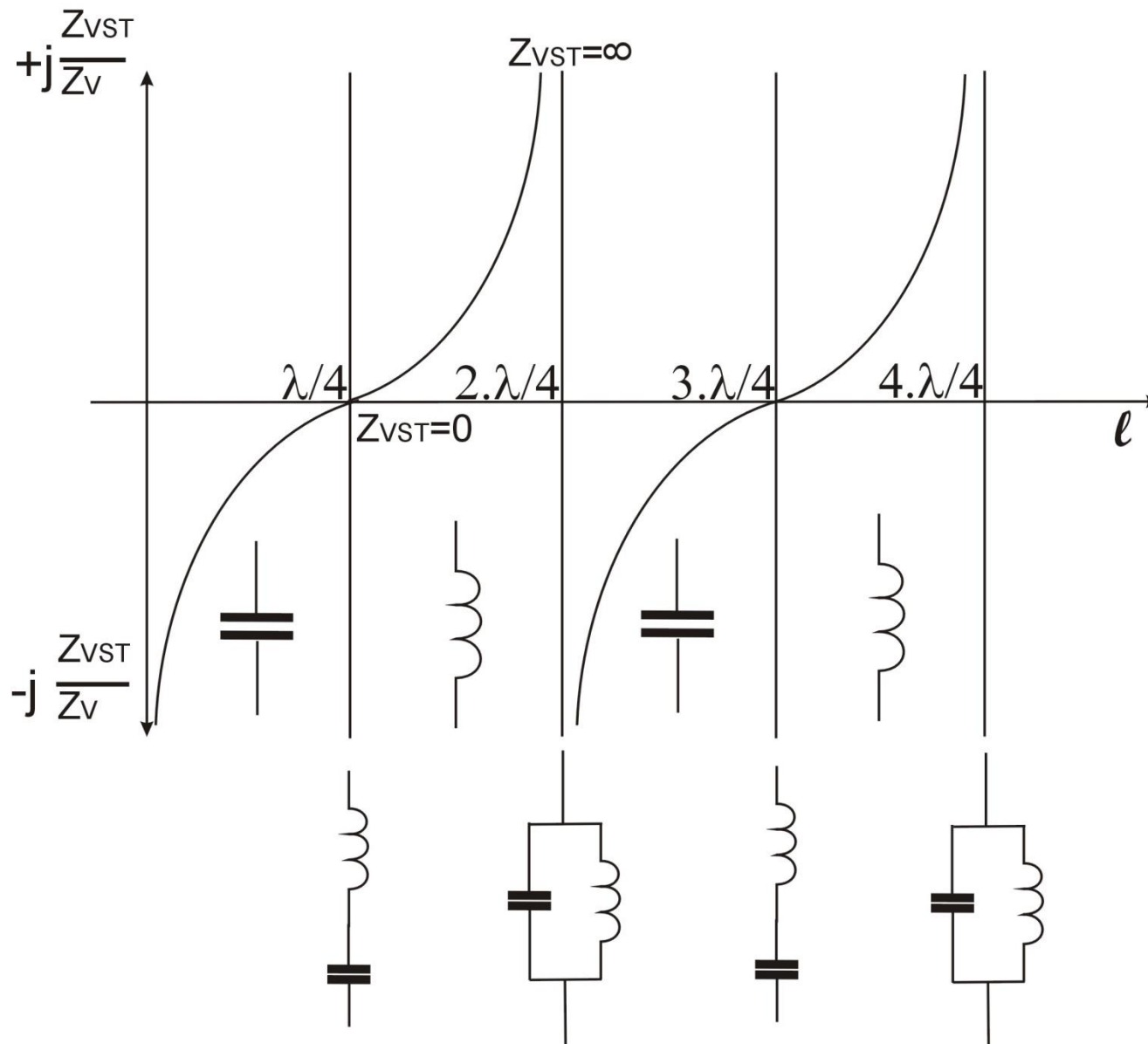
- pri takejto dĺžke „ $l$ “ sa vedenie správa ako **sériový rezonančný obvod (SRO)**
- vstupná impedancia je nekonečne veľká ( $Z_{\text{vst}} = \infty$ ) ak

$$l = 2n \frac{\lambda}{4}$$

- pri takejto dĺžke „ $l$ “ sa vedenie správa ako **paralelný rezonančný obvod (PRO)**
- **Vedenie naprázdno sa správa**
  - ako **sériový rezonančný obvod**, keď jeho dĺžka sa rovná **nepárnemu násobku štvrtín**
  - ako **paralelný rezonančný obvod**, keď jeho dĺžka sa rovná **párnemu násobku štvrtín** (Obr. 9)



Obr. 9 Priebeh charakteru vstupnej impedancie vedenia naprázdno

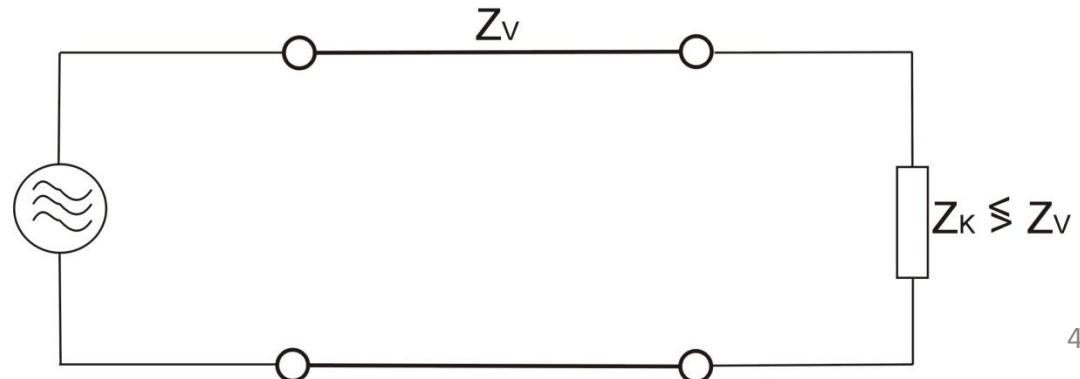


- **Priebeh  $Z_{vst}$**  vedenia naprázdno a nakrátko
  - v mieste kde je **kmitňa prúdu** a **uzol napätia** – impedancia  $Z_{vst}$  je takmer nulová (**veľmi malá**)
  - v mieste kde je **uzol prúdu** a **kmitňa napätia** – impedancia  $Z_{vst}$  je takmer nekonečná (**veľmi veľká**)
- $Z_{vst}$  **nenadobudne** nikdy **nulovú** alebo **nekonečne veľkú** hodnotu, pretože VF vedenie **má vždy** určitý (aj keď malý) **činný odpor**

## VEDENIE ZAŤAŽENÉ IMPEDANCIOU $Z_k \neq Z_v$

(Reálne)

- Ak je vedenie ukončené impedanciou  $Z_k$ , ktorá je väčšia alebo menšia ako  $Z_v$  ( $Z_k \neq Z_v$ ) – **na vedení vznikne**
  - postupujúca vlna
  - aj stojatá vlna



- Pretože amplitúda odrazenej vlny je menšia ako amplitúda vstupujúcej (postupujúcej) vlny **nevytvára sa pri interferencii**:
  - uzol napätia alebo prúdu s **nulovou hodnotou**
  - kmitňa prúdu alebo napätia s **dvojnásobnou amplitúdou** vstupujúcej vlny

**vytvoria sa:**

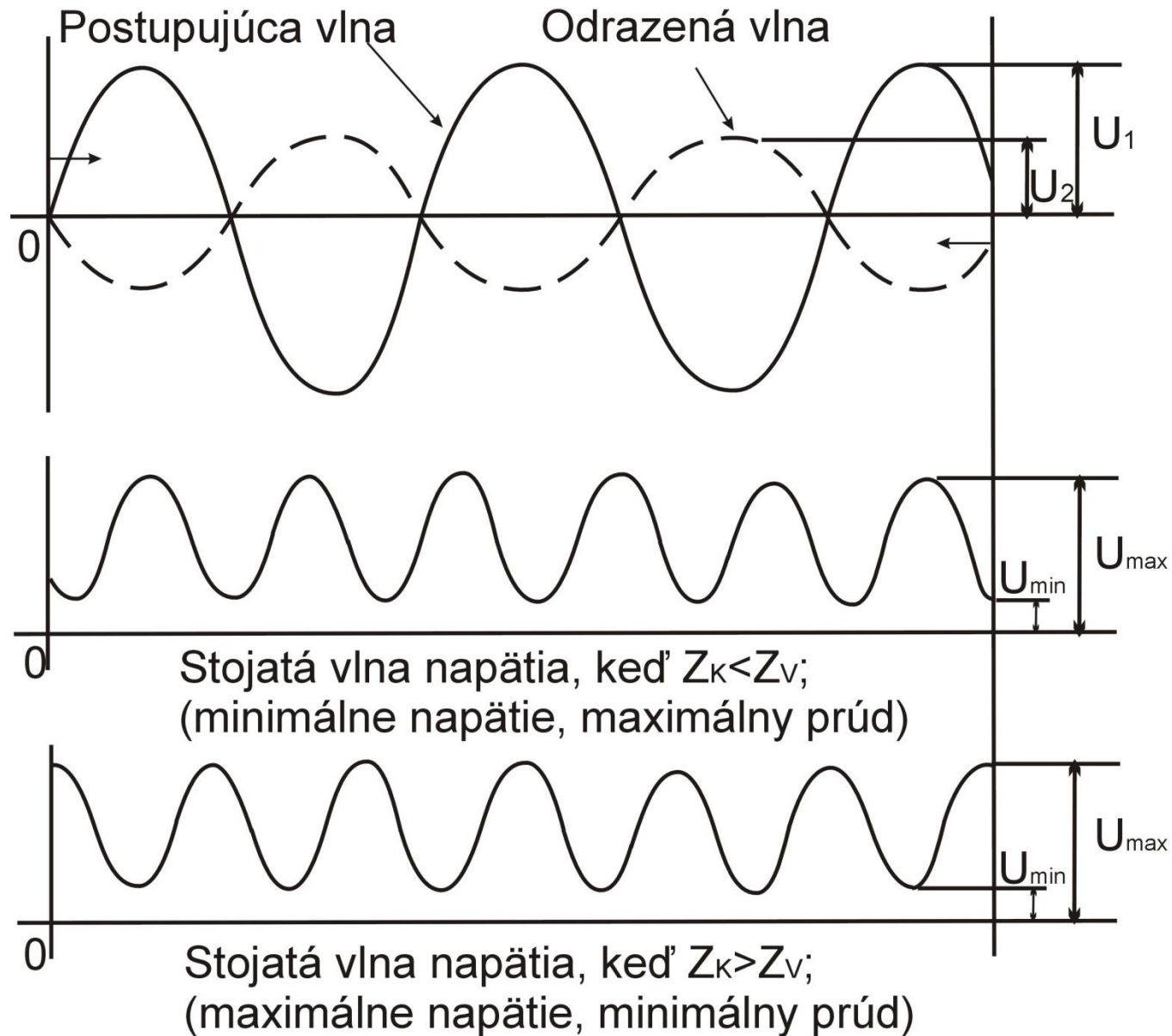
- **maximá** alebo **minimá** stojatej vlny s amplitúdu úmernou stupňu neprispôsobenosti
    - na konci je vždy **maximum napätia** a **minimum prúdu** ak  $Z_k > Z_v$
    - na konci je vždy **minimum napätia** a **maximum prúdu** ak  $Z_k < Z_v$
- (Obr. 10)

- **Vstupná impedancia** takéhoto vedenia je

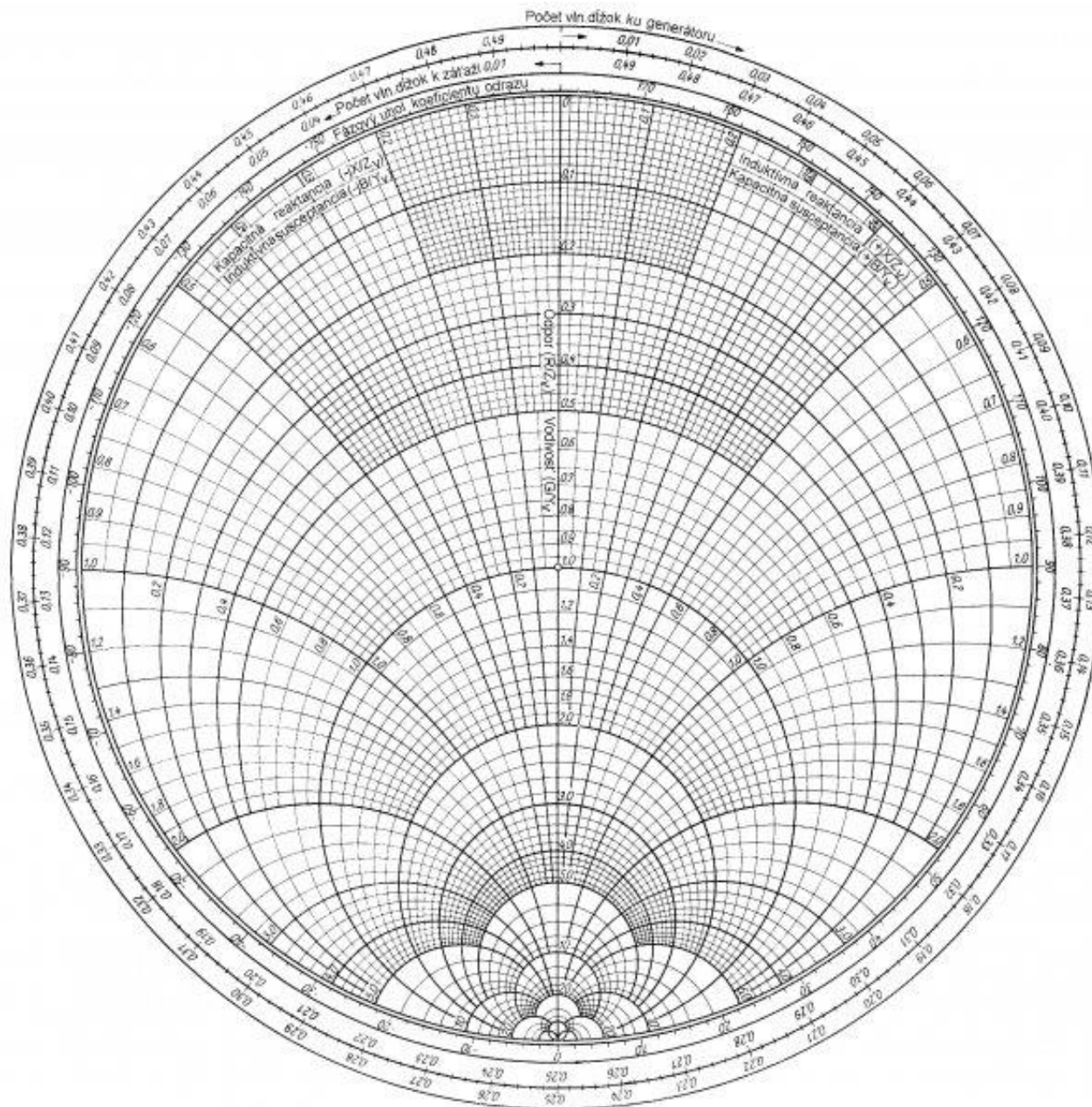
$$Z_{vst} = Z_v \frac{Z_k \cos \beta l + jZ_v \sin \beta l}{Z_v \cos \beta l + jZ_k \sin \beta l}$$

- Keďže výpočty  $Z_{vst}$ , činiteľa odrazu „ $r$ “ a **PSV** sú zložité bola vytvorená pomôcka – **Smithov diagram** (graficko-výpočtová metóda)

Obr. 10 Stojaté vlny na vedení ak  $Z_k \neq Z_v$

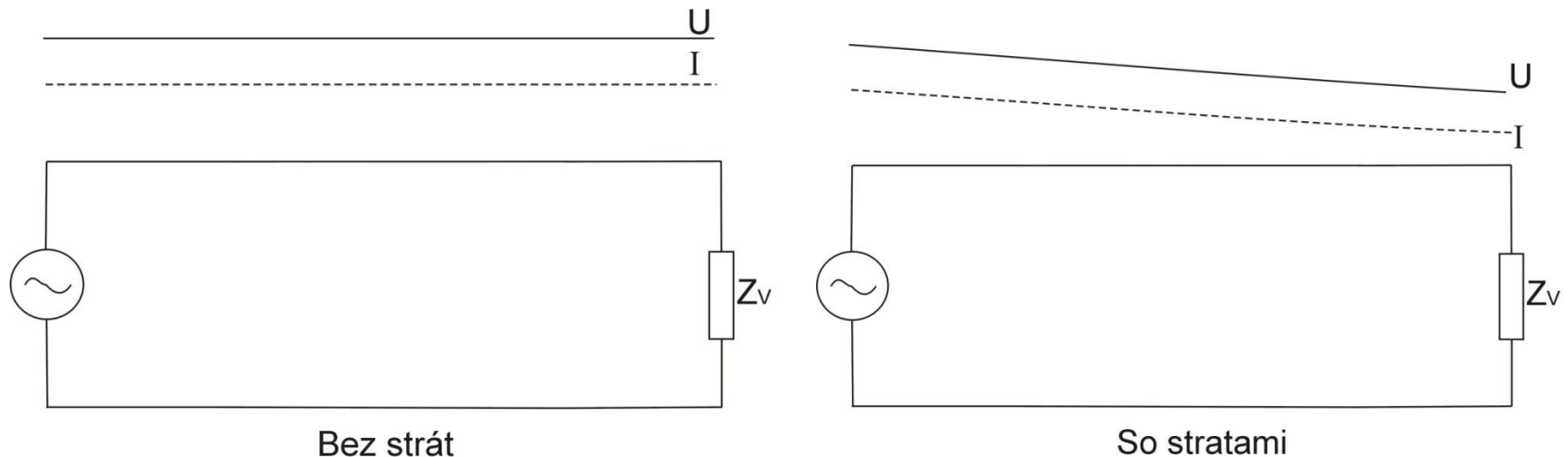


# Smithov diagram



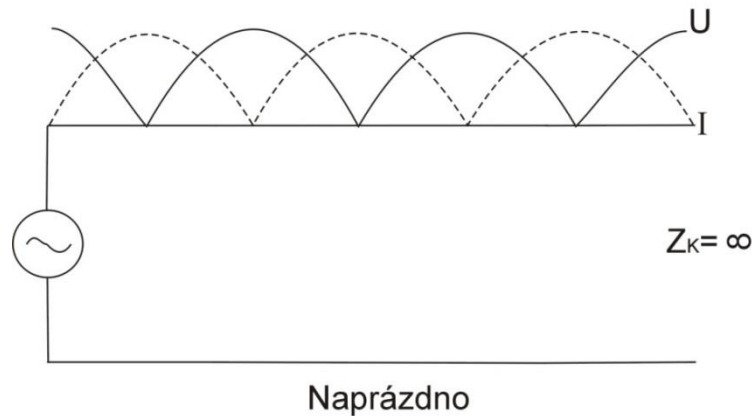
# Pri rôznych zakončeníach vedenia môžu teda nastať tieto prípady (ZHRNUTIE)

- **Prispôbené** zakončenie vedenia - vedenie je zakončené impedanciou, ktorá sa rovná vlnovej impedancii  $Z_v$  vedenia
  - na vedení **nevznikajú stojaté vlny**, t.j. činiteľ odrazu  **$r=0$**  a  **$PSV=1$**
  - pre **vedenie bez strát** je napätie (aj prúd) pozdĺž vedenia konštantné
  - pre **vedenie so stratami** exponenciálne klesá so vzdialenosťou od počiatku vedenia



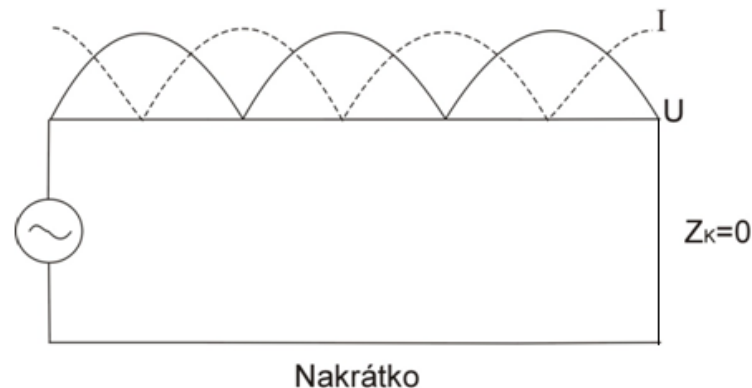
- **Vedenie naprázdno** - má na konci **maximum napätovej** a **minimum prúdovej** vlny

- pre bezstratové vedenie sa **PSV blíži k nekonečnu**
- činiteľ odrazu  **$r = 1$**  (napätie sa odráža vo fáze)

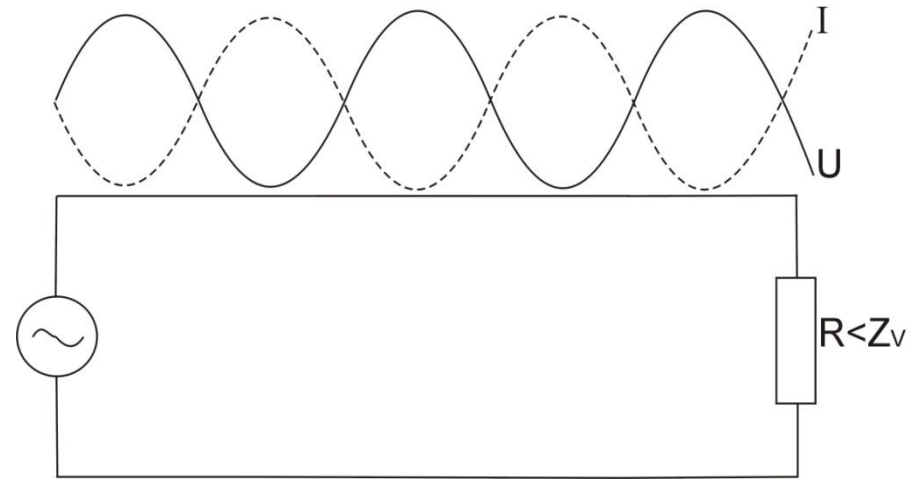
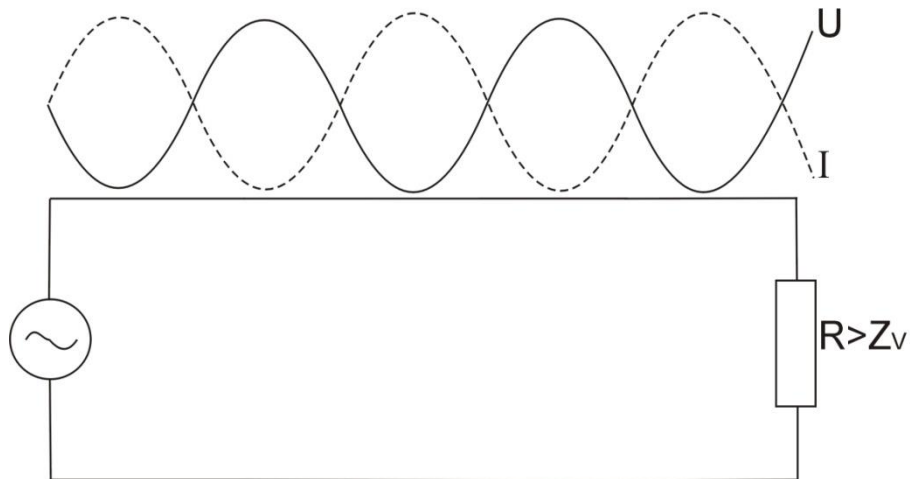


- **Vedenie nakrátko** - má na konci **minimum napätovej** a **maximum prúdovej** vlny

- pre bezstratové vedenie sa **PSV blíži k nekonečnu**
- činiteľ odrazu  **$r = -1$**  (napätie sa odráža v protifáze)

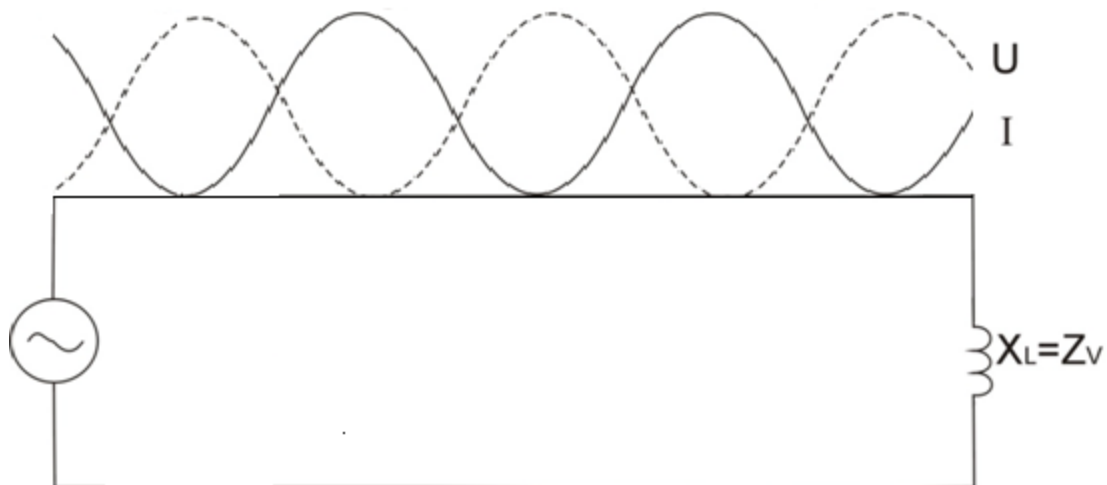
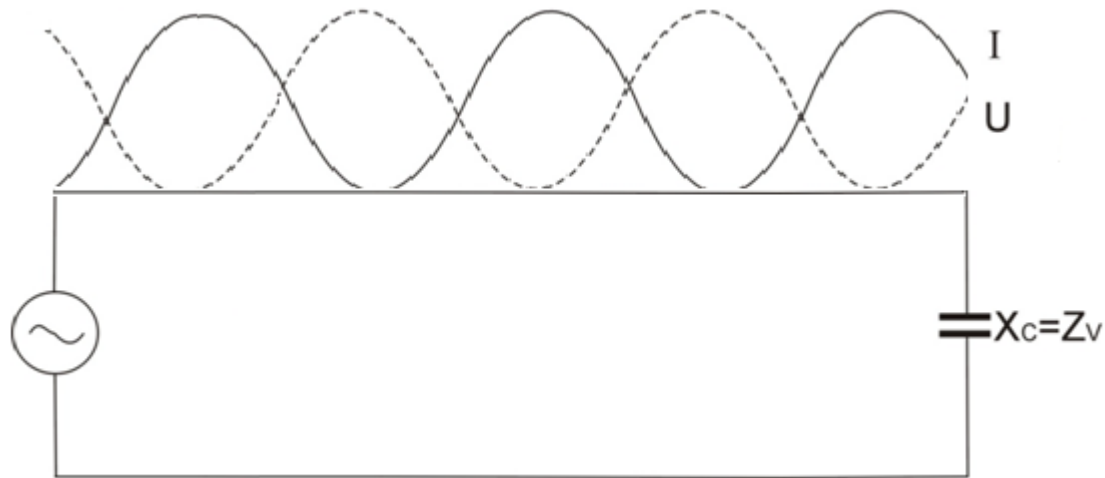


- Vedenie zakončené reálnou impedanciou (rezistorom) - keď  $R \neq Z_v$ , vznikajú na vedení stojaté vlny
  - keď je  $R > Z_v$ , rozloženie stojatých vln pozdĺž vedenia sa blíži stojatým vlnám pre vedenie naprázdno
  - keď je  $R < Z_v$ , rozloženie stojatých vln sa blíži stojatým vlnám pre vedenie nakrátko
  - v oboch prípadoch však minimá napätových aj prúdových vln nedosahujú nulovú hodnotu





- Vedenie zakončené reaktanciou ( $X_C$  a  $X_L$ )
  - v obidvoch týchto prípadoch sú závislosti od pomeru veľkosti  $X_C$  resp.  $X_L$  ku  $Z_V$  napätová aj prúdová vlna fázovo posunutá vzhľadom na koniec vedenia



# POUŽITIE REZONUJÚCICH A NEREZONUJÚCICH VEDENÍ (neprispôsobených a prispôsobených)

- Stojaté vlnenie sa vytvára na VF vedeniach konečnej dĺžky ak je vedenie zakončené iným ako činným odporom, ktorý sa rovná vlnovej impedancii  $Z_v$
- Každé vedenie so stojatými vlnami (**impedančne neprispôsobené**) sa nazýva **rezonujúcim**
- **Impedančne prispôsobené** vedenie je **neresonujúce** (len postupujúca vlna)

## NEREZONUJÚCE VF VEDENIE

- používame na **prenos vf energie** malých a veľkých výkonov
- prenos sa uskutočňuje postupujúcimi vlnami - **PSV** čo najmenší  $\langle 1,2 \rangle$
- ak **nie sú** stojaté vlny na vedení, vedenie je **rovnomerne zaťažené**
- ak sa prenáša vf vedením výkon vysielača do antény, musí byť medzi anténou a vedením **prispôsobovací obvod**, ktorý transformuje impedanciu antény na vlnový odpor vedenia
- impedančné prispôsobenie musí byť **aj na strane vysielača**

## NEREZONUJÚCE VF VEDENIE

(nakrátko a naprázdno s dĺžkami, ktoré sa rovnajú násobkom  $\lambda/4$ )

- používame na vytvorenie **sériového** alebo **paralelného** rezonančného obvodu s vysokou kvalitou
- takéto úseky vf vedení sa používajú ako rezonančné obvody v rozsahu decimetrových vĺn (UKV)

## REZONUJÚCE VF VEDENIE

(nakrátko a naprázdno s dĺžkami, ktoré menšie ako  $\lambda/4$  ( $l < \lambda/4$ ))

- používame ako **reaktanciu induktívneho** alebo **kapacitného** charakteru
  - takéto úseky vf vedení sa používajú na VF ako veľmi **dobrá náhrada cievok a kondenzátorov**
- Vstupná impedancia  $Z_{vst}$ 
    - ak sa dĺžka vedenia rovná celistvému násobku polovln - **vstupná impedancia sa rovná zaťažovacej impedancii**

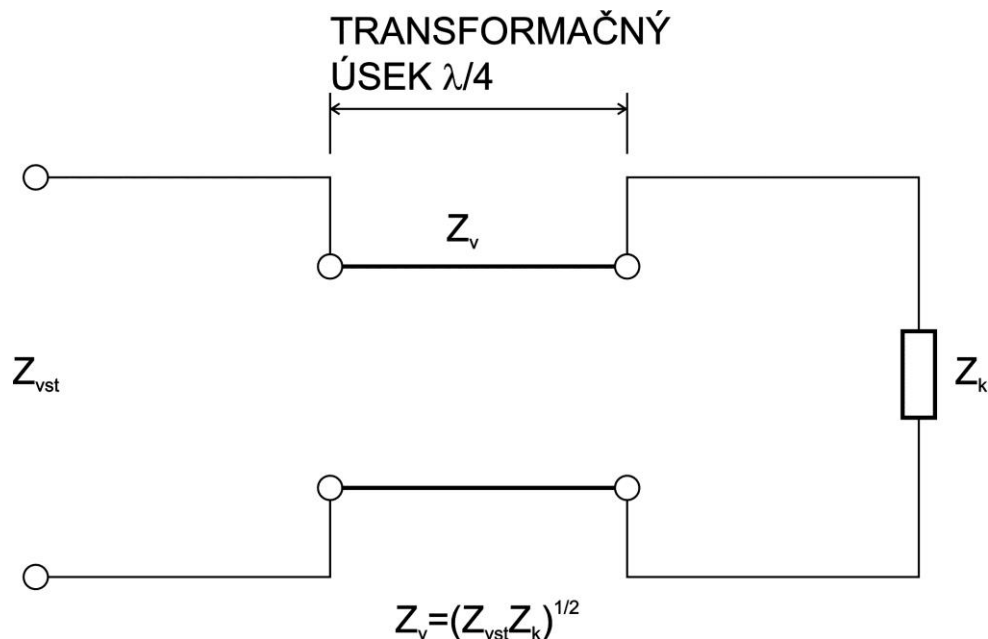
$$l = n \frac{\lambda}{2} \qquad Z_{vst} = Z_k$$

- ak sa dĺžka vedenia rovná **nepárnym násobkom štvrtiny** - vstupná impedancia sa rovná

$$l = \frac{\lambda}{4}(n+1)$$

$$Z_{vst} = \frac{Z_v^2}{Z_k} \Rightarrow Z_v = \sqrt{Z_{vst} Z_k}$$

- vedenie dlhé  $\lambda/4$  alebo  $(n+1)\lambda/4$  **prispôbuje** zaťažovaciu impedanciu  $Z_k$  vstupnej impedancii  $Z_{vst}$
- vlnová impedancia  $Z_v$  štvrtínového vedenia (alebo jeho násobok  $(n+1)$ ) tvorí pritom geometrický stred

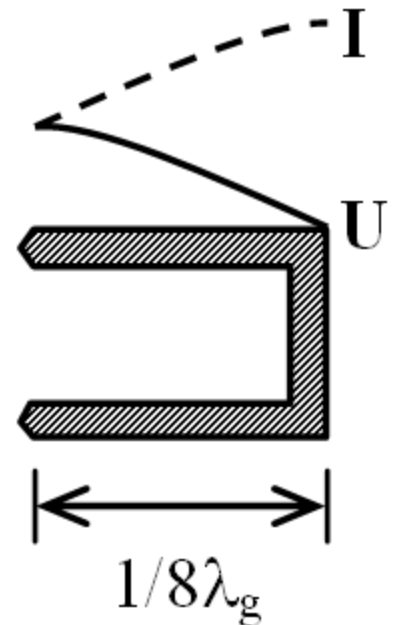
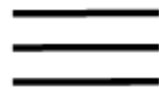
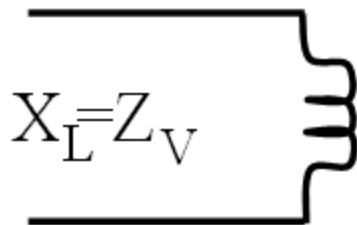


Použitím štvrtínového transformátora možno transformovať len nízke vstupné činné odpory (**do  $1\text{k}\Omega$** ) –  $Z_v$  by bolo veľmi veľké

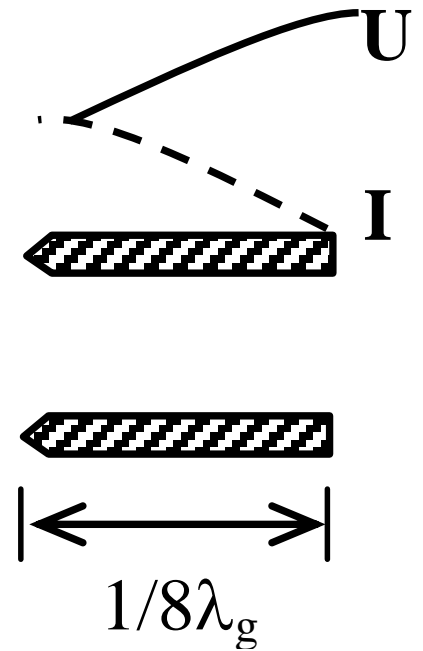
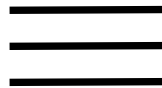
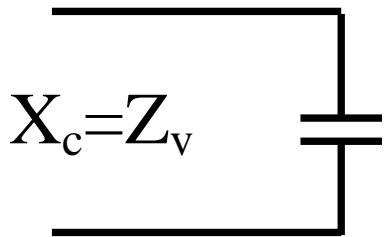
Transformácia impedancie vedením dĺžky  $\lambda / 4$

Na vysokých frekvenciách sa často používa úsek vedenia dĺžky jednej štvrtiny a jednej osminy vlnovej dĺžky vlny vo vedení ako súčasť rezonančných obvodov

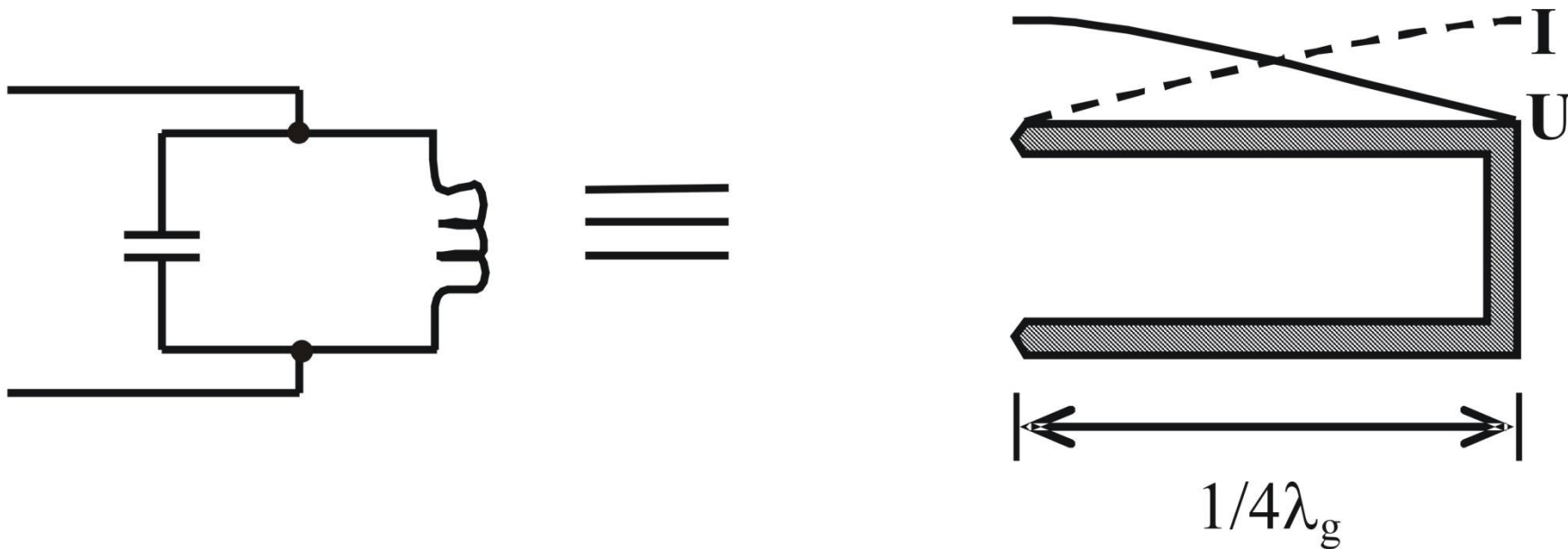
- úsek skratovaného vedenia, kratší ako  $1/4 \lambda_g$  sa pre generátor javí ako **indukčnosť**
  - keď je dĺžka tohto úseku vedenia **presne**  $1/8 \lambda_g$ , potom platí  $X_L = Z_V$



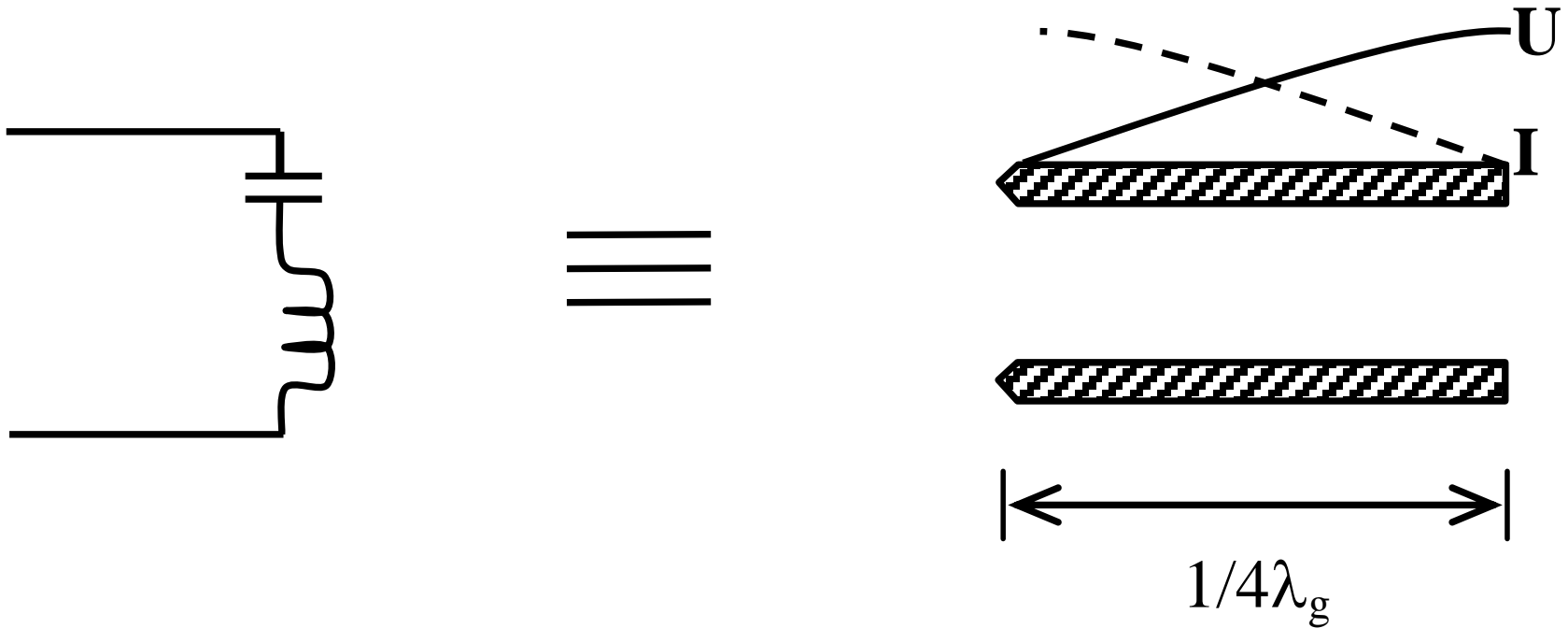
- úsek „otvoreného“ vedenia, kratší ako  $1/4 \lambda_g$  sa pre generátor javí ako kapacita
  - keď je dĺžka tohto úseku vedenia presne  $1/8 \lambda_g$ , potom platí  $X_c = Z_v$



- úsek vedenia dĺžky  $1/4 \lambda_g$  pôsobí pre vedenie nakrátko ako paralelný rezonančný obvod
  - tento obvod môžeme použiť ako impedančný transformátor



- úsek vedenia dĺžky  $1/4 \lambda_g$  pôsobí pre vedenie naprázdno ako **sériový rezonančný obvod**
  - tento obvod môžeme použiť ako impedančný transformátor





# Kontrolné otázky

- Načo sa používa „VF“ vedenie?
- Čo je základnou vlastnosťou „VF“ vedenia?
- Ako delíme obvody s rozloženými parametrami?
- Ktoré sú základné veličiny „VF“ homogénneho vedenia?
- Ktoré sú základné veličiny „VF“ homogénneho vedenia v pozdĺžnom smere?
- Ktoré sú základné veličiny „VF“ homogénneho vedenia v priečnom smere?
- Čím sú dané hodnoty charakteristických veličín „VF“ homogénneho vedenia pri určitej frekvencii?
- Čo je mierou energie nazhromaždenej magnetickým poľom na jednotku dĺžky?
- Čo je mierou strát, ktoré vznikajú vo vedení (pretekaním prúdu vo vodičoch)?
- Čo je mierou energie nazhromaždenej v elektrickom poli (rozdiel potenciálov medzi vodičmi vytvára elektrické pole)?
- Čo je mierou strát vzniknutých v izolante medzi dvoma vodičmi?

- Aké je transverzálne elm pole (TEM), t.j. elektrické a magnetické pole pozdĺž vodiča?
- Aké sú vzťahy pre vlnu napätia a prúdu v ľubovoľnom mieste vedenia (vedieť aj reprezentáciu jednotlivých členov a nakresliť obrázok)?
- Napíšte vzťahu pre mieru šírenia „ $\gamma$ “ elm vlny a popíšte jednotlivé členy.
- Napíšte vzťahu pre vlnovú impedanciu „ $Z_v$ “.
- Napíšte vzťahu pre vlnovú impedanciu „ $Z_v$ “ bezstratového vedenia.
- Uveďte dve podmienky, za ktorých môže existovať na „VF“ vedení iba postupujúca vlna.
- Pre ktorú veličinu sú na vedení nakrátko na konci vedenia kmitne stojatej vlny?
- Pre ktorú veličinu sú na vedení nakrátko na konci vedenia uzly stojatej vlny?
- Pre ktorú veličinu sú na vedení naprázdno na konci vedenia kmitne stojatej vlny?
- Pre ktorú veličinu sú na vedení naprázdno na konci vedenia uzly stojatej vlny?

- Kedy hovoríme o prispôsobenom vedení? (z hľadiska porovnania „ $Z_k$ “ a „ $Z_v$ “)
- Kedy hovoríme o vedení nakrátko? (z hľadiska veľkosti „ $Z_k$ “)
- Kedy hovoríme o vedení naprázdno? (z hľadiska veľkosti „ $Z_k$ “)
- Aká je veľkosť činiteľa odrazu („ $r$ “) pri prispôsobenom vedení?
- Aká je veľkosť činiteľa odrazu („ $r$ “) pre vedenie nakrátko?
- Aká je veľkosť činiteľa odrazu („ $r$ “) pre vedenie naprázdno?
- Aké hodnoty dosahujú „ $r$ , PSV,  $Z_k$ ,  $U_{kvs}$  a  $I_{kvs}$ “ pre vedenie nakrátko?
- Aké hodnoty dosahujú „ $r$ , PSV,  $Z_k$ ,  $U_{kvs}$  a  $I_{kvs}$ “ pre vedenie naprázdno?
- Aké hodnoty dosahujú „ $r$ , PSV a  $Z_k$ “ pre prispôsobené vedenie?
- Čomu je rovná vstupná impedancia „ $Z_{vst}$ “ pre prispôsobené vedenie?
- Ako sa mení napätie a prúd pri prispôsobenom vedení?
- Napíšte vzťahy pre napätie a prúd pri prispôsobenom vedení.
- Aké vlny sú na vedení, ak je „VF“ vedenie zakončené vlnovou impedanciou  $Z_k = Z_v$ ?
- Nakreslite zapojenie vedenia nakrátko a priebehy „ $U$ “ a „ $I$ “ pri tomto zapojení.

- Čomu je rovná vstupná impedancia „ $Z_{vst}$ “ pre vedenia nakrátko?
- Kedy bude mať „ $Z_{vst}$ “ pre vedenie nakrátko induktívny charakter?
- Kedy bude mať „ $Z_{vst}$ “ pre vedenie nakrátko kapacitný charakter?
- Aký charakter má pri párnom násobku štvrtvlny vedenie nakrátko?
- Aký charakter má pri nepárnom násobku štvrtvlny vedenie nakrátko?
- Priebehy charakteru vstupnej impedancie „ $Z_{vst}$ “ pre vedenia nakrátko.
- Nakreslite zapojenie vedenia naprázdno a priebehy „ $U$ “ a „ $I$ “ pri tomto zapojení.
- Čomu je rovná vstupná impedancia „ $Z_{vst}$ “ pre vedenie naprázdno?
- Kedy bude mať „ $Z_{vst}$ “ pre vedenie naprázdno induktívny charakter?
- Kedy bude mať „ $Z_{vst}$ “ pre vedenie naprázdno kapacitný charakter?
- Aký charakter má pri párnom násobku štvrtvlny vedenie naprázdno?
- Aký charakter má pri nepárnom násobku štvrtvlny vedenie naprázdno?
- Priebehy charakteru vstupnej impedancie „ $Z_{vst}$ “ pre vedenia naprázdno.
- Aké vlny sú na vedení, ak je „ $VF$ “ vedenie zakončené vlnovou impedanciou  $Z_k \neq Z_v$ ?

- Nakreslite vlny na vedení, ak je „VF“ vedenie zakončené vlnovou impedanciou  $Z_k \neq Z_v$ .
- O akom „VF“ vedení hovoríme ak je pomerom stojatých vln  $PSV = 1$ ?
- Ktoré „VF“ vedenie nazývame nerezonujúce?
- Ktoré „VF“ vedenie nazývame rezonujúce?
- Aké vstupné činné odpory možno transformovať použitím štvrtvlnového transformátora?
- Ako musí byť zakončené „VF“ vedenie dĺžky „ $1/8\lambda_g$ “ aby platilo  $Z_v = X_L$  (úsek „VF“ vedenia sa javí ako indukčnosť)?
- Ako musí byť zakončené „VF“ vedenie dĺžky „ $1/8\lambda_g$ “ aby platilo  $Z_v = X_C$  (úsek „VF“ vedenia sa javí ako kapacita)?
- Ako musí byť zakončené „VF“ vedenie dĺžky „ $1/4\lambda_g$ “ aby sa tento úsek „VF“ vedenia javil ako paralelný rezonančný obvod „PRO“?
- Ako musí byť zakončené „VF“ vedenie dĺžky „ $1/4\lambda_g$ “ aby sa tento úsek „VF“ vedenia javil ako sériový rezonančný obvod „SRO“?

# Zoznam použitých skratiek a symbolov

## Skratky

- PA prijímacia anténa
- PRO paralelný rezonančný obvod
- PSV pomer stojatých vln
- SRO sériový rezonančný obvod
- VA vysielacia anténa
- VF vysokofrekvenčné

## Symbols

- $\alpha$  miera tlmenia
- $\beta$  miera fázového posunu
- $\gamma$  miera šírenia
- $\lambda$  vlnová dĺžka
- $Z_v$  vlnová impedancia



Ďakujem za pozornosť