

Prednáška 05:
ZÁKLADY ELEMENTÁRNEJ TEÓRIE
VF VEDENÍ

doc. Ing. Ľuboš Ovseník, PhD.

(lubos.ovsenik@tuke.sk, tel. 421 55 602 4336)

[http://kemt-old.fei.tuke.sk/predmety/EVaA/_materialy/
Prednasky/Pr05/Pr05.pdf](http://kemt-old.fei.tuke.sk/predmety/EVaA/_materialy/Prednasky/Pr05/Pr05.pdf)

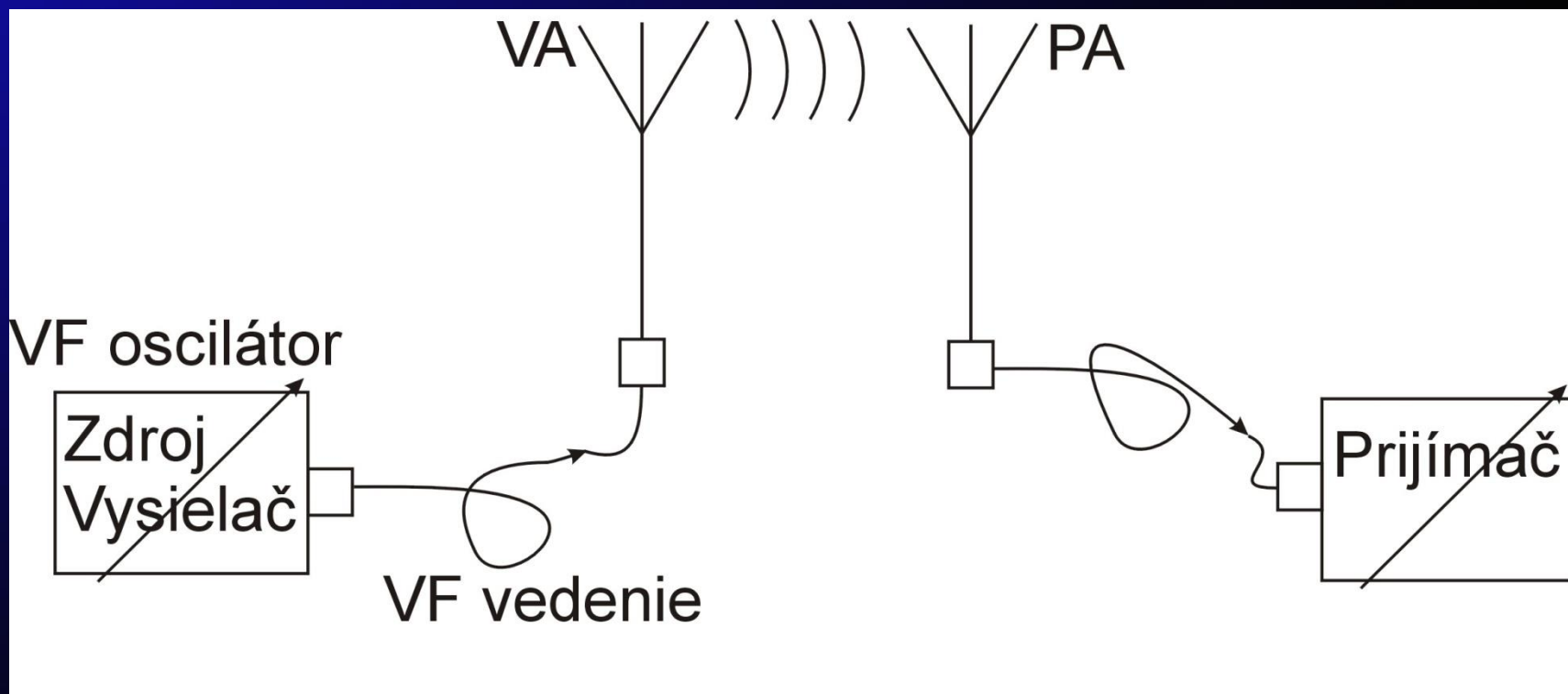
<http://los.fei.tuke.sk/>

Obsah prednášky

- 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

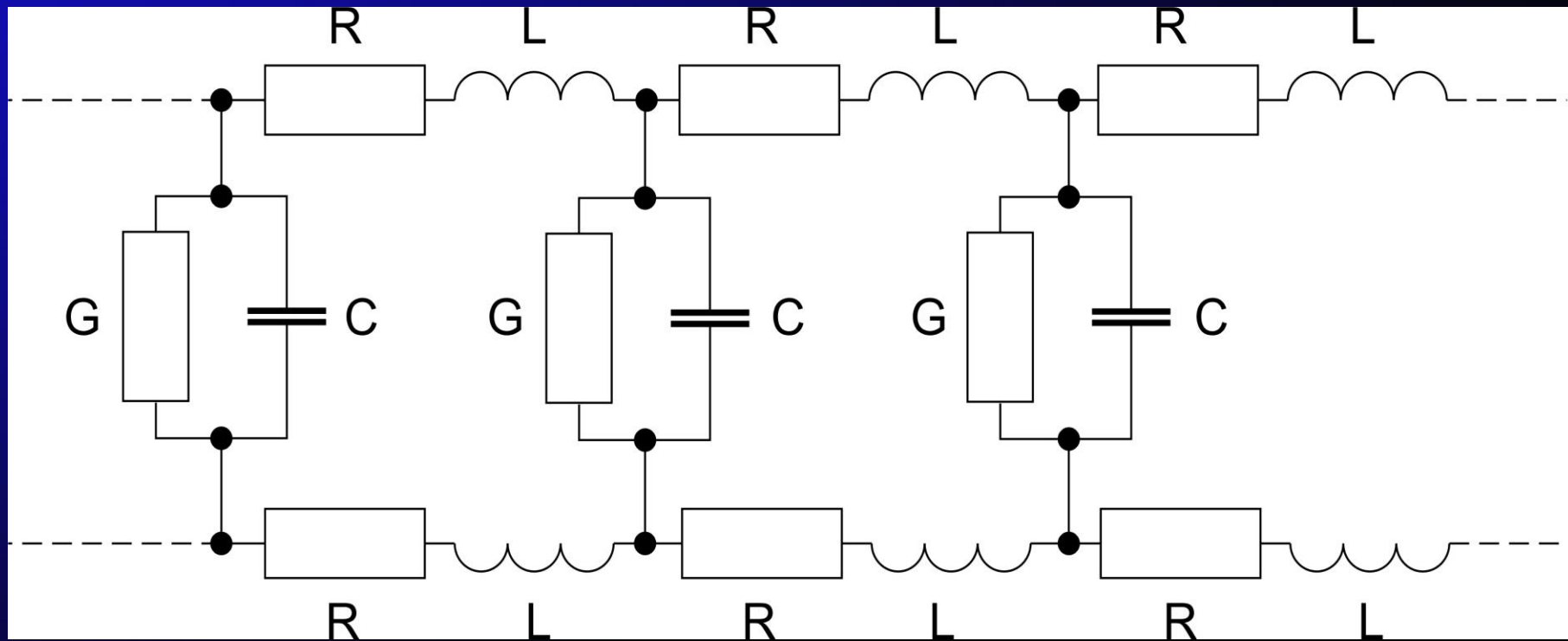


- **Základné veličiny** VF homogénneho vedenia sú (Obr.5.1)
 - v **pozdĺžnom smere** - odpor (R) a indukčnosť (L)
 - v **priečnom smere** - vodivosť (G) a kapacita (C)

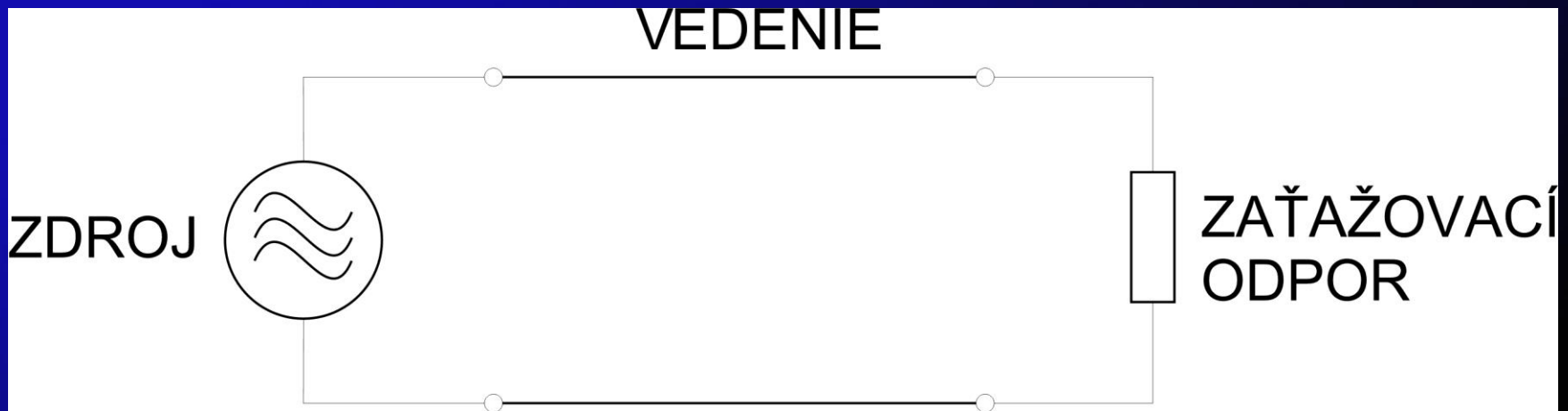
- Základnou vlastnosťou VF vedenia je, že jeho **elektrické parametre** (odpor, indukčnosť, vodivosť a kapacita) sú **rozložené pozdĺž celého vedenia** - **OBVODY S ROZLOŽENÝMI PARAMETRAMI**

- **Obvody s rozloženými parametrami** môžeme rozdeliť:
 - na obvody alebo vedenia s **rovnomerne** rozloženými parametrami (**homogénne**) (Obr.5.1, Obr. 5.2, Obr.5.3)
 - na obvody s **nerovnomerne** rozloženými parametrami (**nehomogénne**)

Obr.5.1 Náhradná schéma homogénneho vedenia

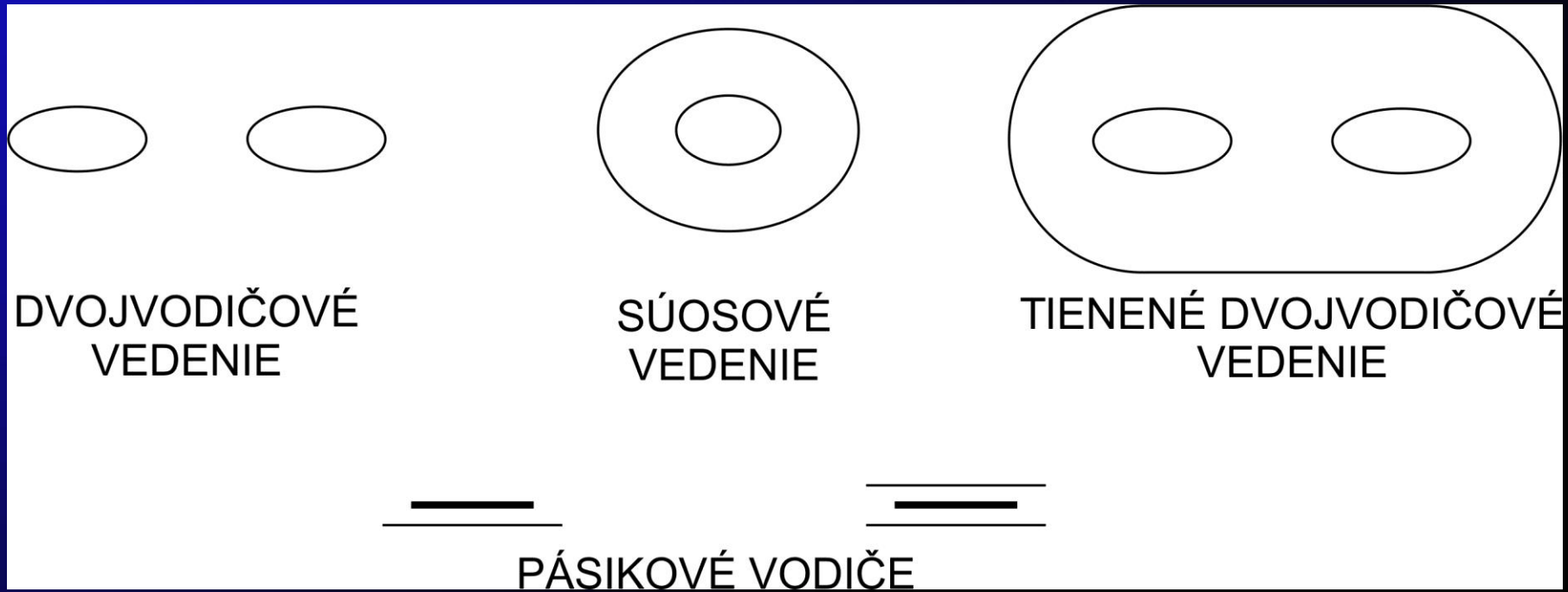


Obr.5.2 Homogénne vedenie

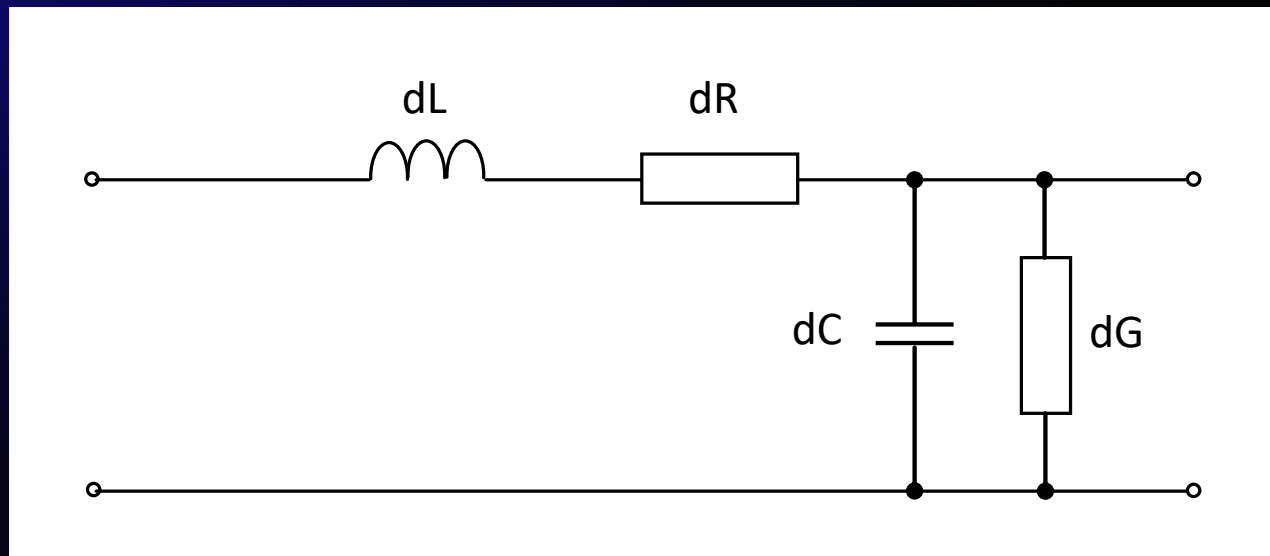


- **Homogénne vedenie** sa skladá
 - z **dvoch paralelných vodičov** pričom (Obr. 5.2)
 - prierez vodiča, vzdialenosť vodičov a izolačný materiál obklopujúci vodiče **má rovnaké hodnoty po celej dĺžke vedenia** (Obr.5.3)
- **Hodnoty charakteristických veličín** pri určitej frekvencii sú dané
 - len **materiálom, 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.5.3 Prierezové konfigurácie rôznych druhov homogénnych vedení

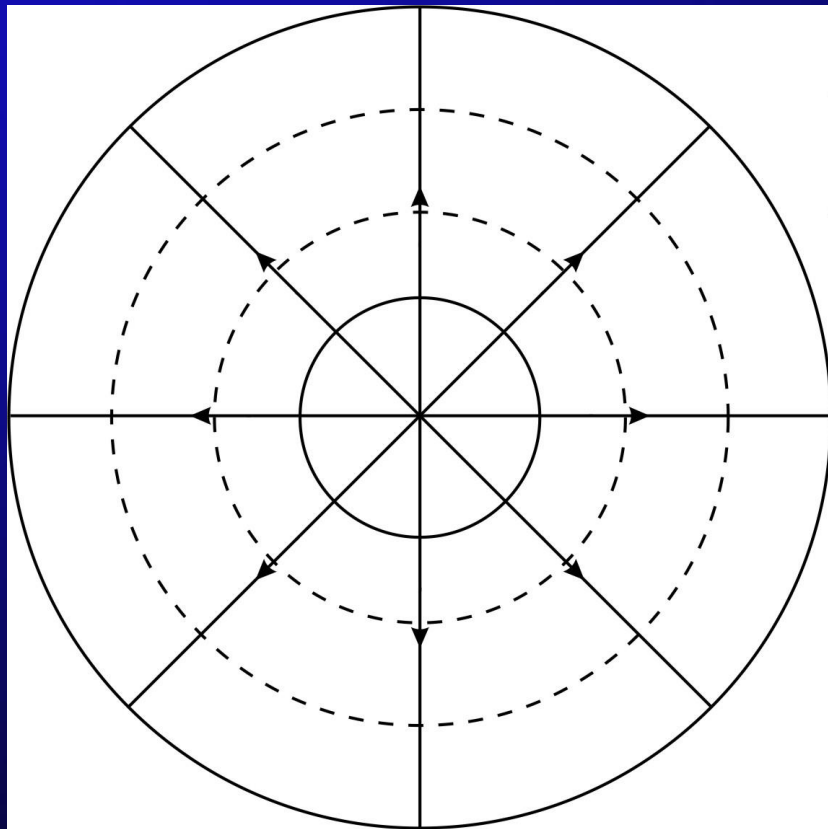


- **Prúdy vo vedení** vytvárajú magnetické pole okolo vodiča
 - mierou energie nazhromaždenej magnetickým poľom na jednotku dĺžky je **indukčnosť na jednotku dĺžky**
 - mierou strát, ktoré vznikajú vo vedení (pretekaním prúdu vo vodičoch) je **činný odpor na jednotku dĺžky**
 - mierou energie nazhromaždenej 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**

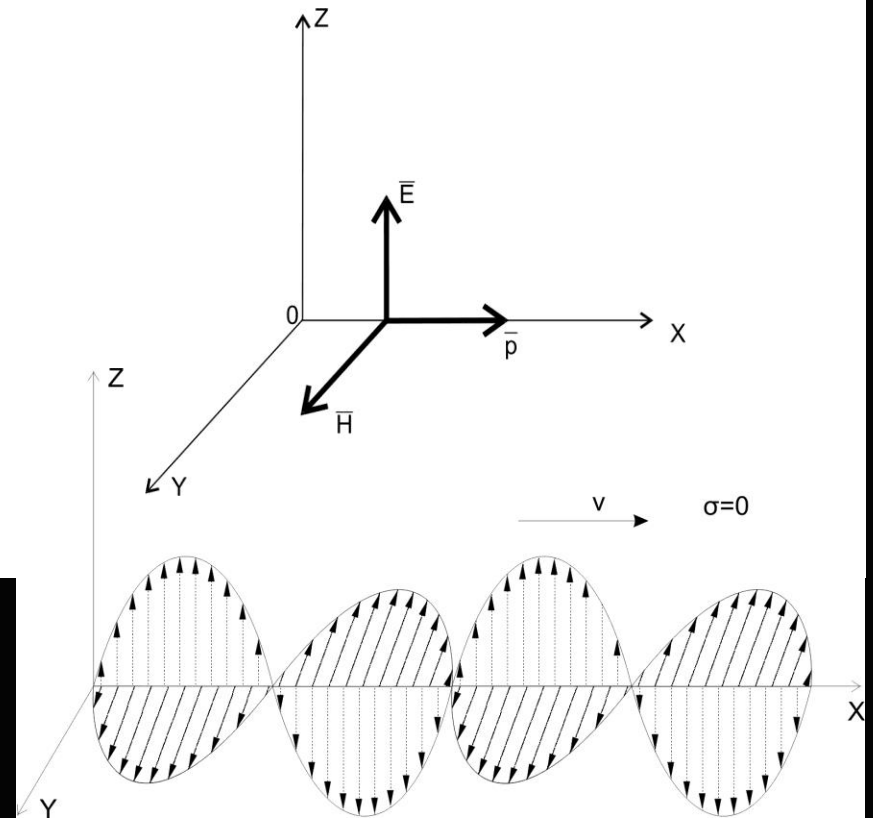


- Pretekánie prúdu vo vedení a vytváranie napätia je sprevádzané elm poľom
 - elektrické a magnetické pole pozdĺž vodiča je **kolmé na vodič** v celej jeho dĺžke (Obr.5.4)
 - takéto pole sa nazýva **transverzálne elm pole (TEM)**
 - vlnenie sa šíri vedením od najnižších frekvencií, teoreticky od nuly
 - zvyšovaním frekvencie straty na vedení narastajú
 - v oblasti **cm** vln sa nepoužívajú dvojvodičové vedenia, ale **vlnovody**

Obr.5.4 Transverzálne elektromagnetické vlnenie (TEM) v súosovom vedení



—— ELEKTRICKÉ POLE
- - - - MAGNETICKÉ POLE



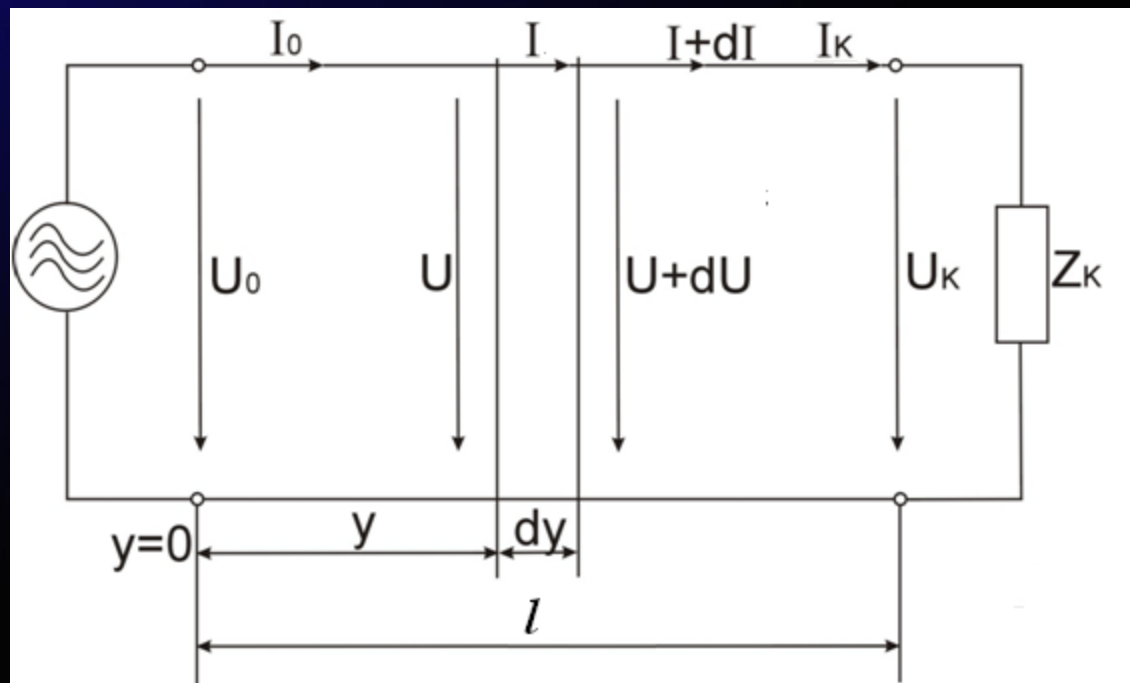
Vlastnosti vysokofrekvenčných vedení

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

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

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

Z_v – Vlnová impedancia

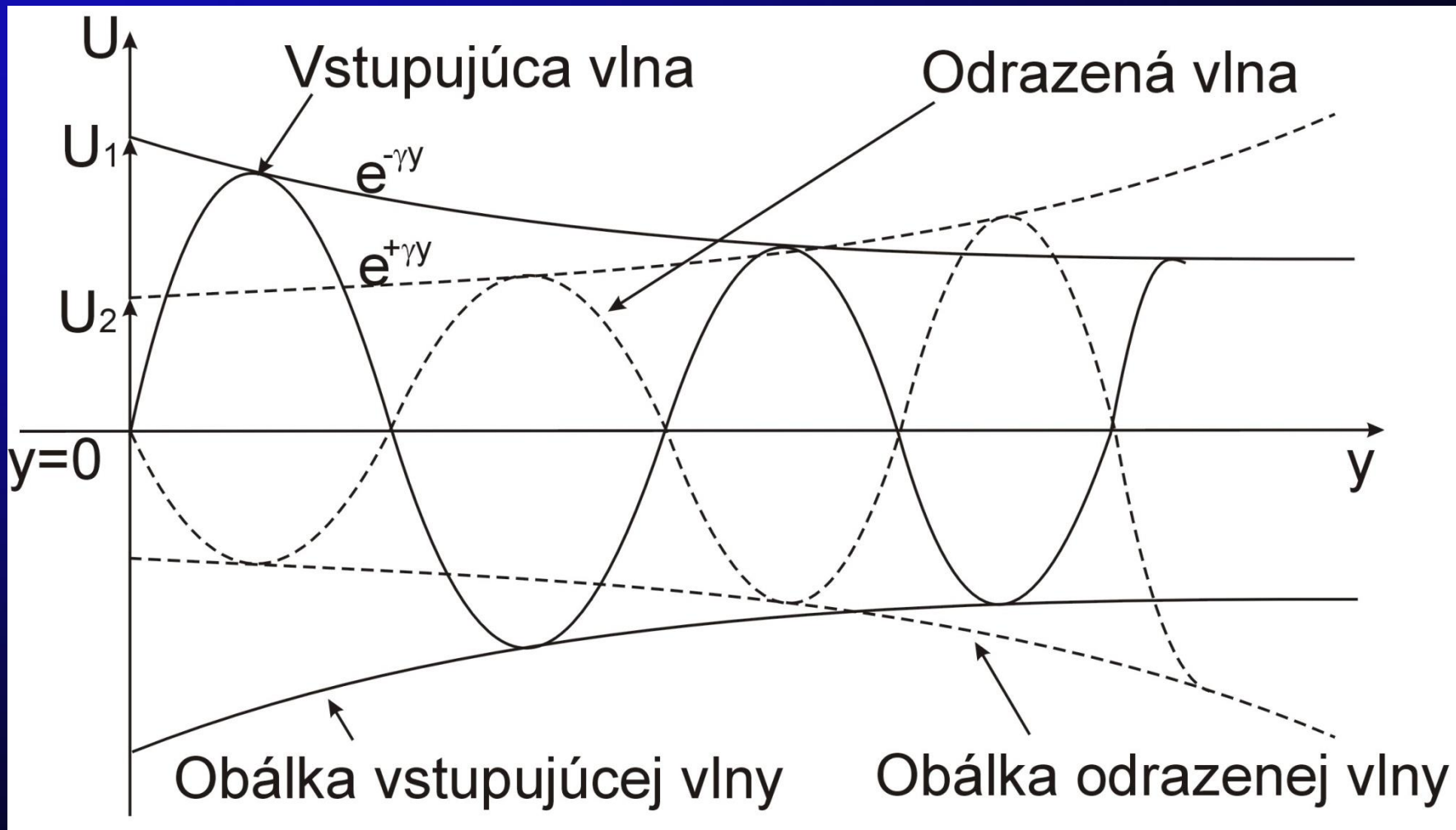
- Z týchto rovníc je zrejmé, že vlna napätia a prúdu v ľubovoľnom mieste vedenia sa skladá z dvoch častí
 - zo vstupujúcej vlny napätia, príp. prúdu
 - z odrazenej vlny napätia, príp. prúdu
 - členy pri výraze $e^{-\gamma y}$ vyjadrujú veľkosť vstupujúcej vlny (U_1, I_1)
 - členy pri výraze $e^{+\gamma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

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

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

- 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.5.5)

Obr.5.5 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.5.5)

- Súčet ($U_1 + U_2$) dáva napätie na vstupných svorkách vedenia

- Všetky úvahy, ktoré sa týkajú napät'ovej vlny, platia aj pre prúdovú vlnu, lebo rovnica $I_{(y)}$ má presne ten istý tvar ako rovnica $U_{(y)}$

- Veličina γ 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** (γ) komplexná veličina

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

α je miera tlmenia

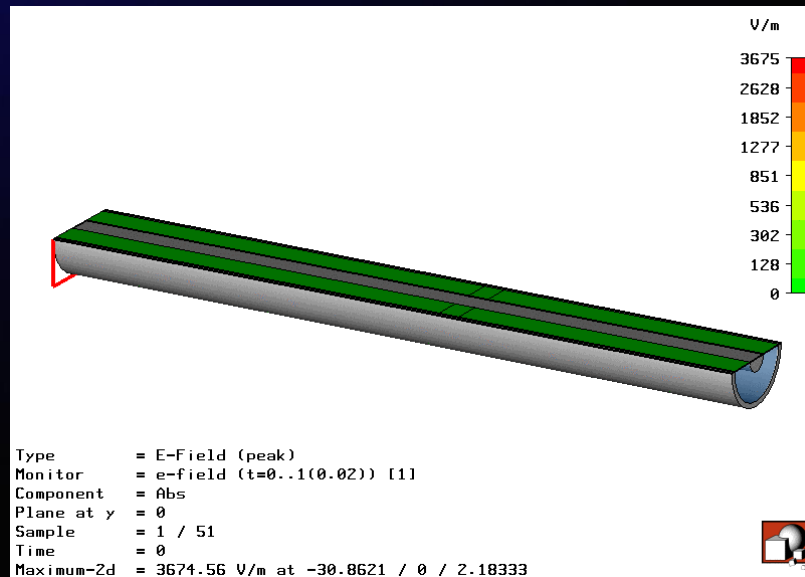
β je miera fázového posunu homogénneho vedenia

- Vlnová impedancia Z_v

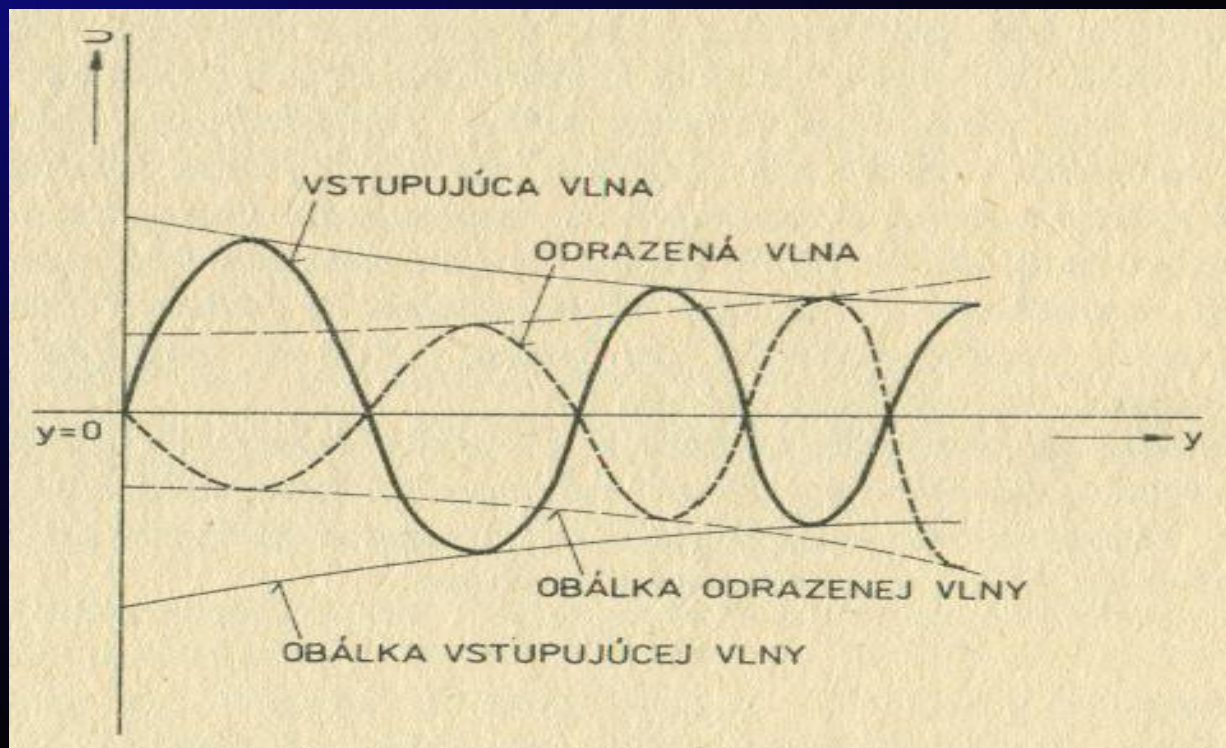
$$Z_v = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

POSTUPUJÚCA A ODRAZENÁ VLNA NA VEDENÍ

- Z uvedeného je zrejmé, že na vedení môže vzniknúť napäťová 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 prispôbená** 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 neprispôsobenej 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 $U_2 = 0$, $I_2 = 0$

$$U = U_1 e^{-\gamma y}$$

$$I = I_1 e^{-\gamma y}$$

Základné diferenciálne rovnice homogénneho vedenia

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

TLMENIE A FÁZOVÝ POSUN

- Napät'ová a prúdová vlna na VF vedení je **tlmená vplyvom strát vedenia**
 - priebeh tlmenia pozdĺž vedenia je charakterizovaný výrazom $e^{-\alpha y}$
 - miera tlmenia (α) je vyjadrená v Np/m
 - celková veľkosť tlmenia αy je daná) dĺžkou vedenia (l)
 - **špecifická miera tlmenia** je pre určitý druh vedenia konštantná veličina, závisí však od frekvencie vlnenia
- Postupom harmonickej napät'ovej 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** (β), ktorý sa vyjadruje v radiánoch na jednotku dĺžky (rad/m)
 - **veľkosť fázy** pozdĺž vedenia vyjadruje výraz $e^{-\beta y}$
 - pri harmonických priebehoch sa vzdialenosť (y), na ktorej sa mení fáza o 2π radiánov, **nazýva vlnová dĺžka** (λ)

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

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

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

- Pre harmonické vlnenie každého druhu je fázová rýchlosť

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

- Miera šírenia (γ) je potom pre určitú uhlovú frekvenciu (ω)

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

- 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 - ωL a ωC 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 (β) je

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

VLNOVÁ IMPEDANCIA BEZSTRATOVÉHO VEDENIA

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

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

- Pomer U/I pri bezstratovom vedení nazývame **vlnovou impedanciou vedenia (Z_v)**
- L a C sú parametre vedenia

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

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

- **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. 70Ω , 300Ω 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**)

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

$$Z_v = \frac{U_{kvs}}{I_{kvs}}$$

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

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

- 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

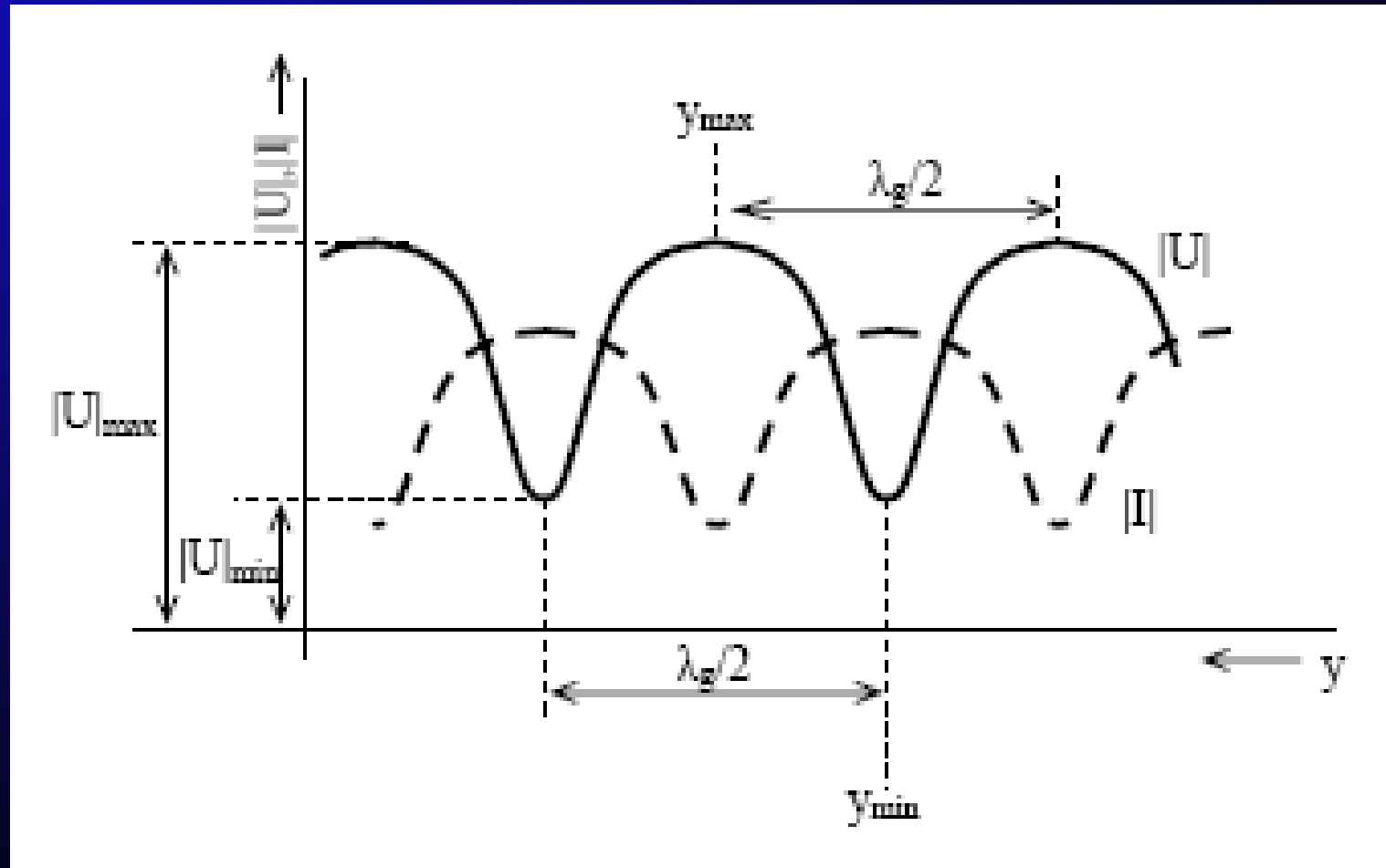
- Extrémne hodnoty dosiahne činiteľ odrazu prípadoch, keď

- $Z_v = Z_k$ - $r = 0$ (vedenie prispôbené)
- $Z_k = 0$ - $r = -1$ (vedenie na konci nakrátko)
- $Z_k = \infty$ - $r = 1$ (vedenie na konci naprázdno)

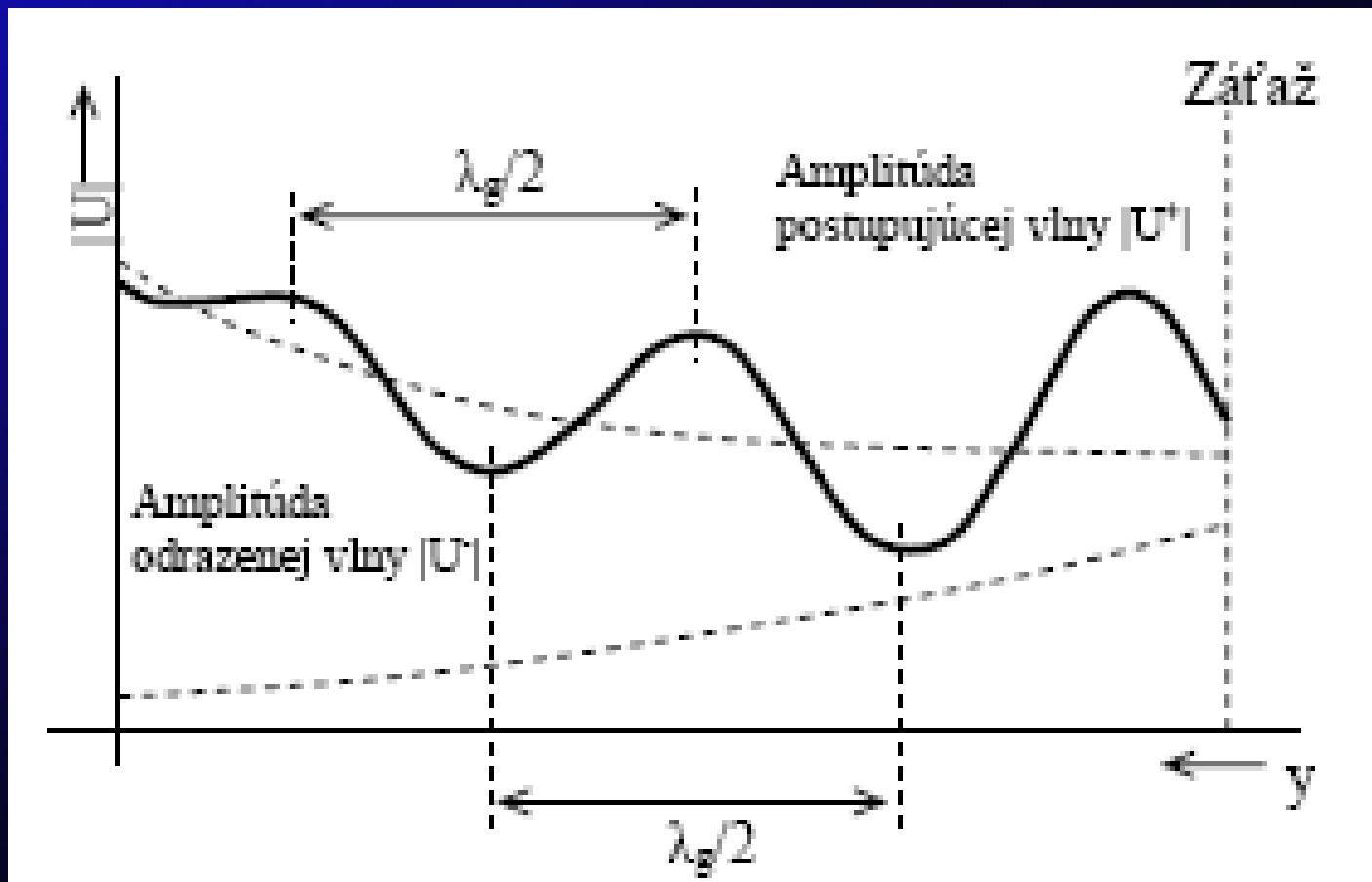
- Na neprispôbenom vedení vzniká interferenciou (skladaním) priamej a odrazenej vlny stojatá vlna

- Priebeh stojatej vlny má pozdĺž vedenia minimá a maximá s rozdielom tým menším, čím viac sa blíži Z_k ku Z_v

Stojaté vlny na vedení bez strát



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 = ∞** (vedenie **naprázdno, nakrátko**)
- V praktických aplikáciách sa **snažíme** navrhnuť a **udržať** v prevádzke VF **vedenie v prispôsobenom** stave - **nereálne**
- Pri VF vedeniach televíznych vysielacích 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 ($Z_k = Z_V$) – prispôsobené
 - 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 prispôsobenie)

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

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

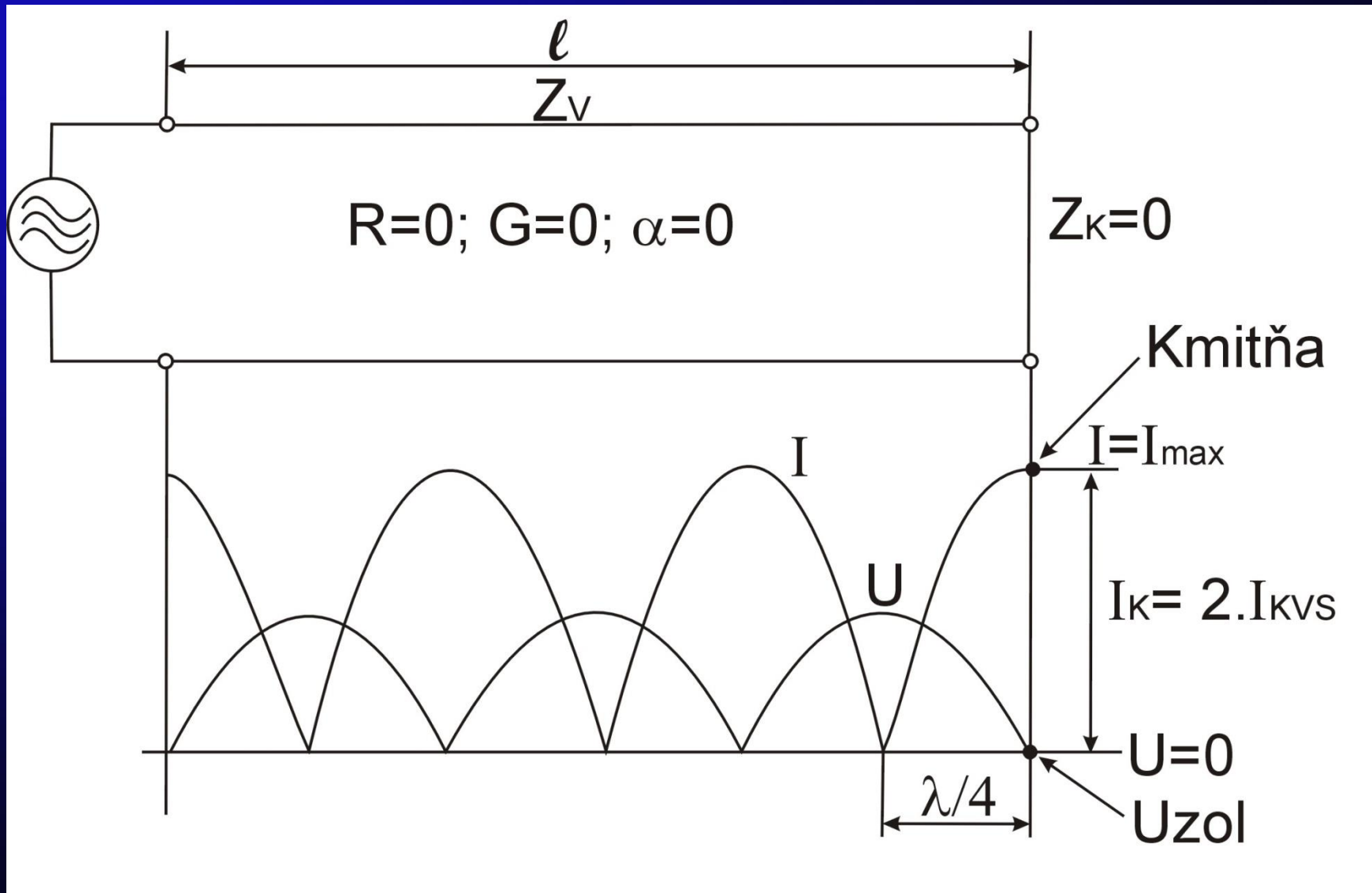
$$I = I_0 e^{-j(\omega t + \beta y)}$$

- **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.5.6)
- **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°
- Pretože na konci vedenia nastáva úplný odraz
 - činiteľ odrazu $r = -1$
 - pomer stojatých vln **PSV** = ∞

Obr.5.6 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.5.6)

■ 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 (βl) – 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 $\operatorname{tg} \beta l < 0$

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

(Obr.5.7)

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

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

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

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

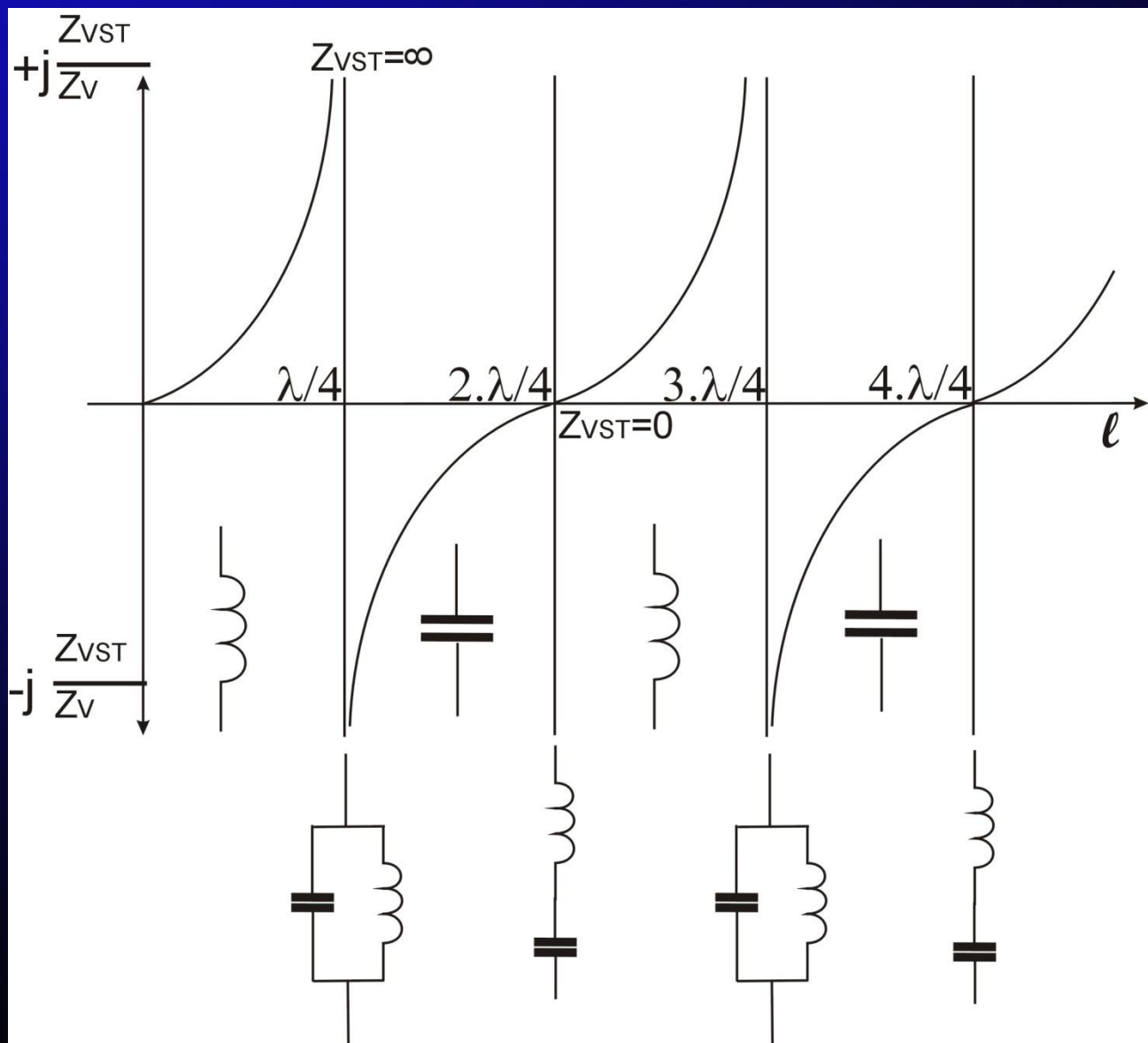
$$l = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}$$

- 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 štvrtvln
- ako paralelný rezonančný obvod, keď jeho dĺžka sa rovná nepárnemu násobku štvrtvln (Obr.5.7)

Obr.5.7 Pribeh charakteru vstupnej impedancie vedenia nakrátko



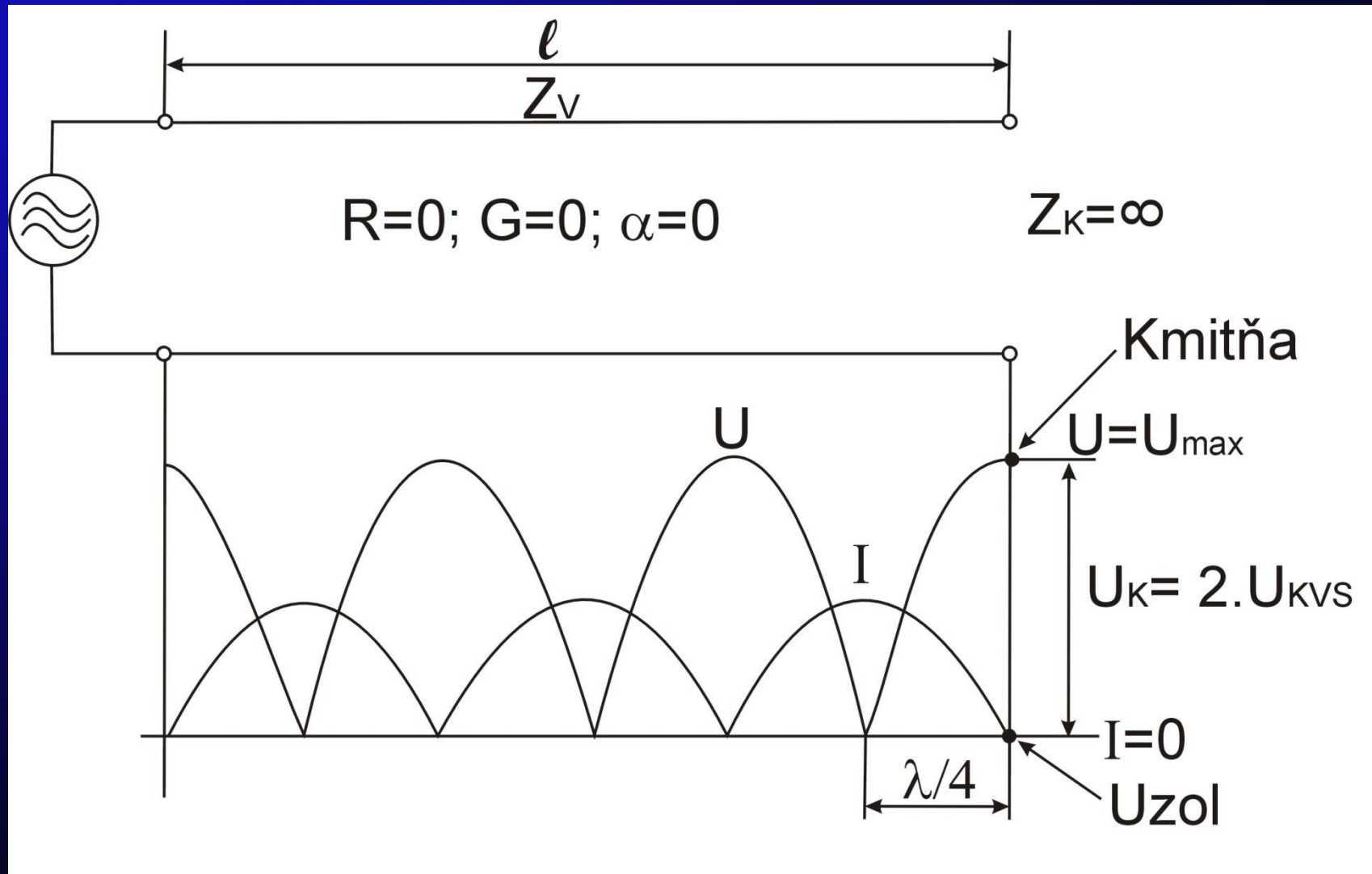
VEDENIE NA KONCI NAPRÁZDNO

- Vedenie na konci spojené naprázdno - $Z_k = \infty$ (otvorené) (Obr.5.8)
- 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.5.8 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 (βl) – 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.5.9)

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

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

- pri takejto dĺžke sa vedenie správa ako sériový rezonančný obvod (SRO)

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

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

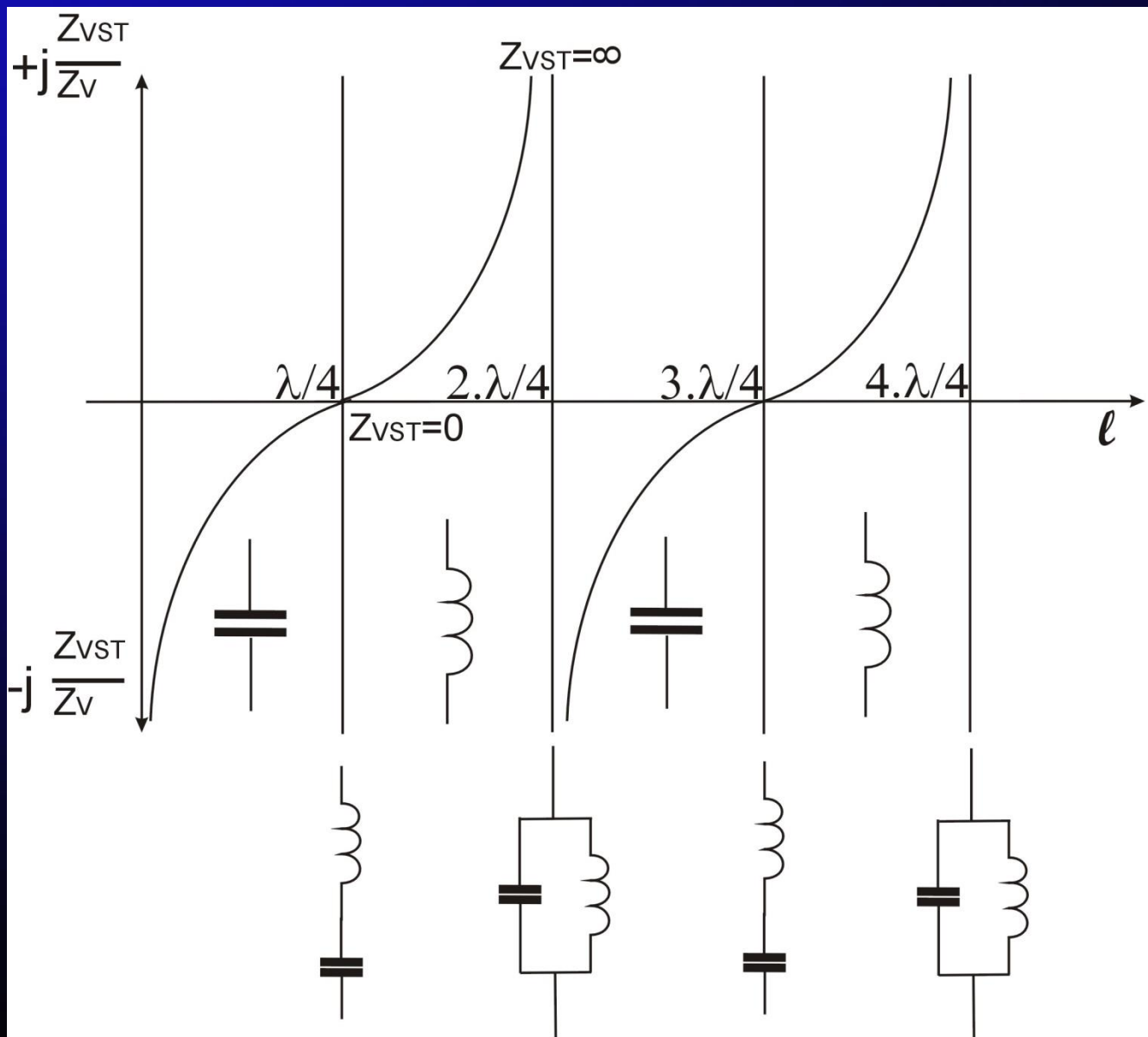
- pri takejto dĺžke sa vedenie správa ako paralelný rezonančný obvod (PRO)

■ Vedenie naprázdno sa správa

- ako **sériový rezonančný obvod**, keď jeho dĺžka sa rovná **nepárnemu** násobku štvrtvlny

- ako **paralelný rezonančný** obvod, keď jeho dĺžka sa rovná **párnemu** násobku štvrtvlny (Obr.5.9)

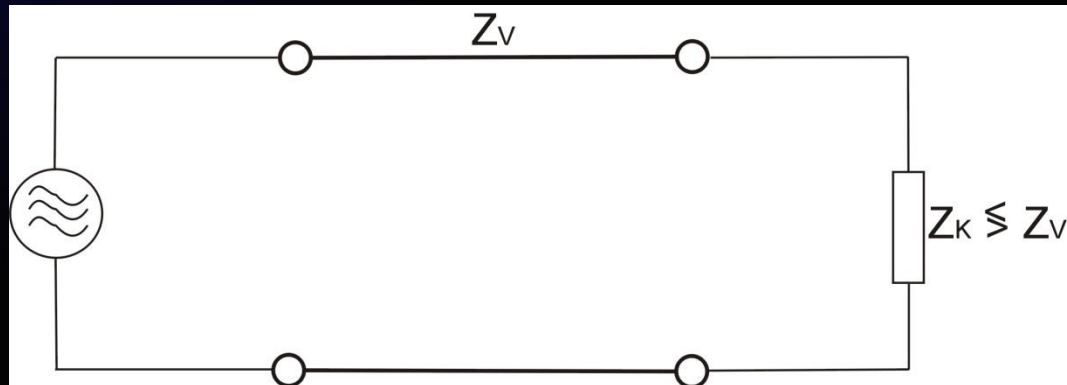
Obr.5.9 Pribeh charakteru vstupnej impedancie vedenia naprázdno



- **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 ZAŽAŽENÉ 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

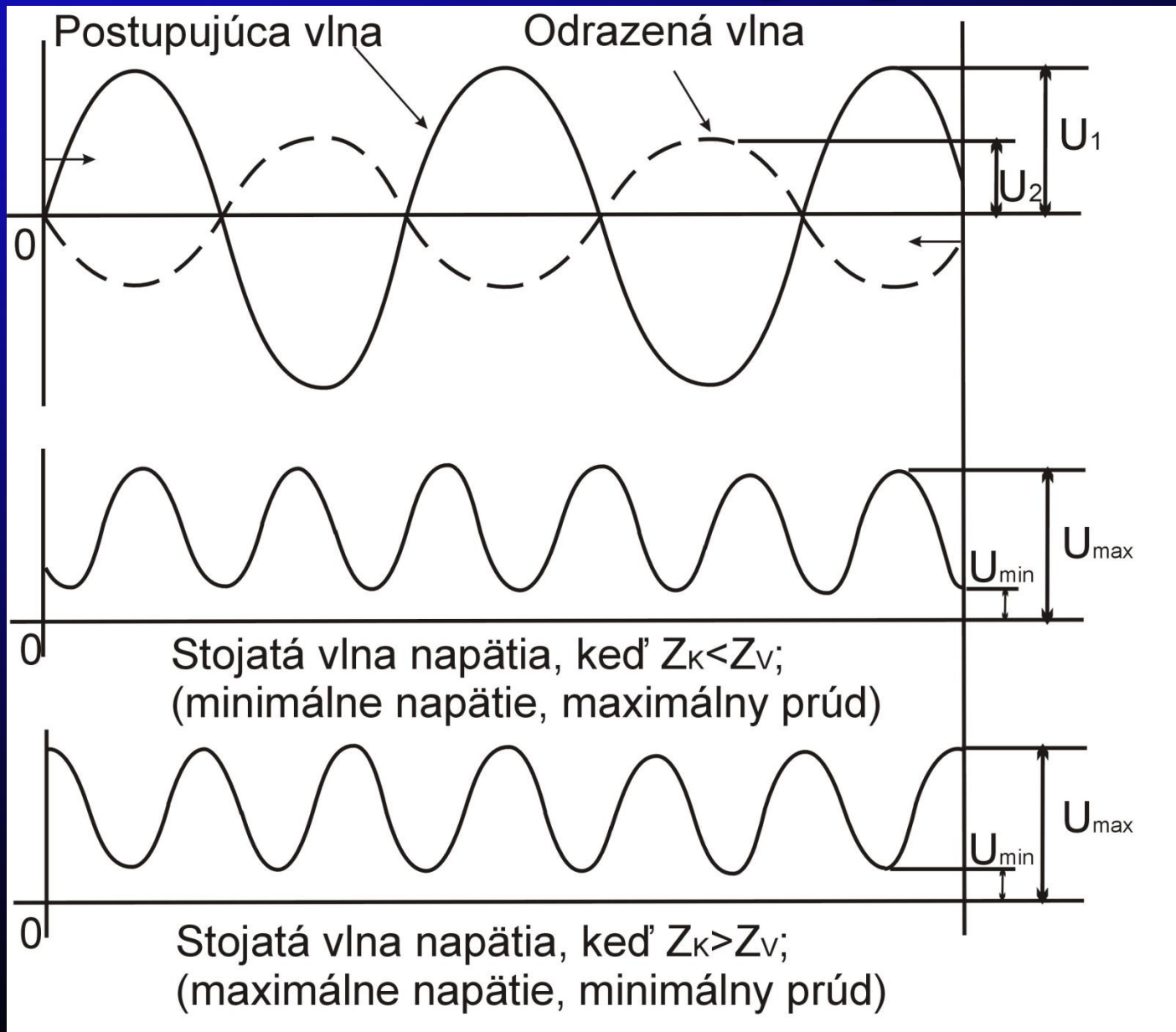
vytvoria sa:

- **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.5.10)
- **Vstupná impedancia** takéhoto vedenia je

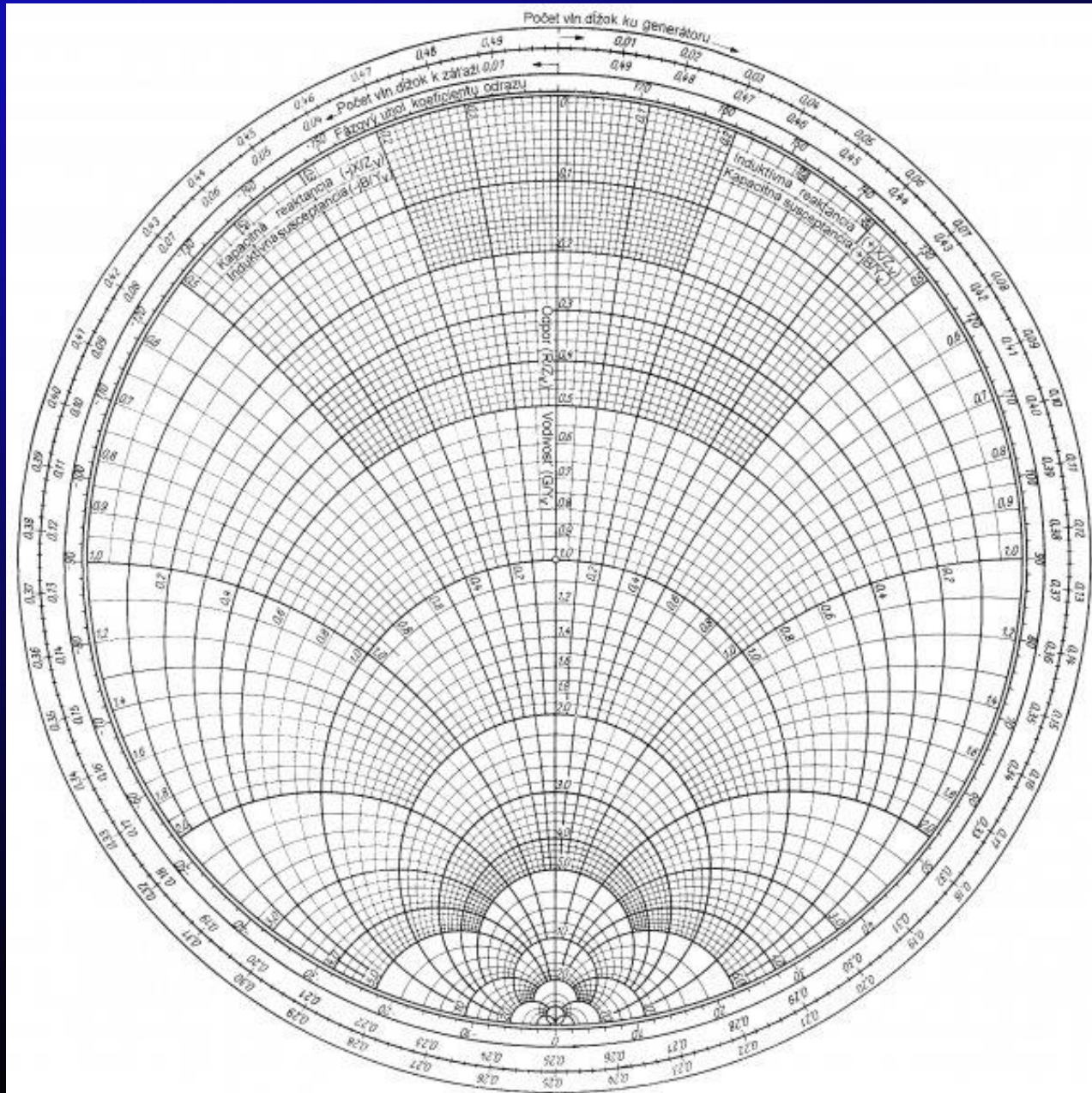
$$Z_{vst} = Z_v \frac{Z_k \cos \beta l + jZ_v \sin \beta l}{Z_v \cos \beta l + jZ_k \sin \beta l}$$

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

Obr.5.10 Stojaté vlny na vedení, ak $Z_k \neq Z_v$

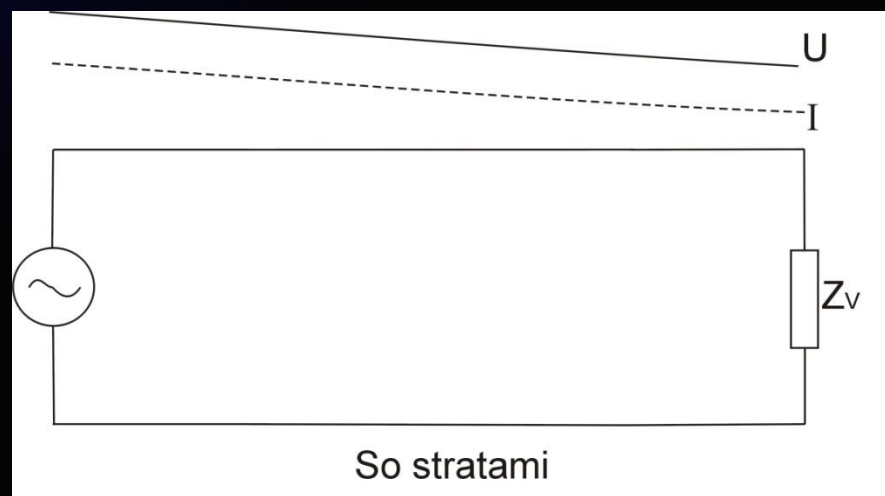
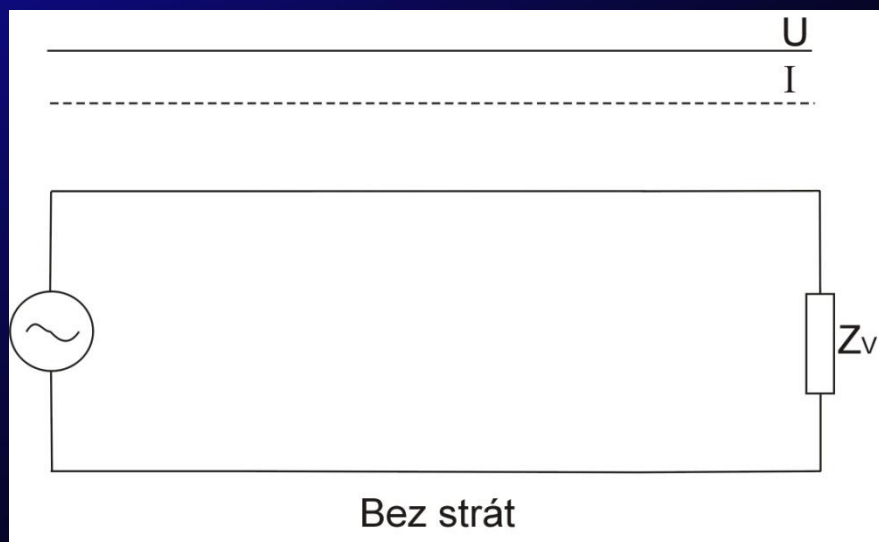


Smithov diagram



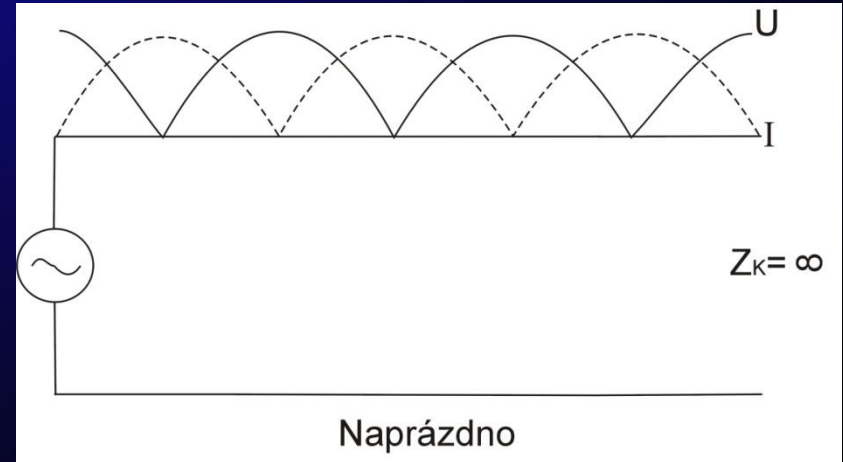
Pri rôznych zakončeníach vedenia môžu teda nastať tieto prípady (ZHRNUTIE)

- **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



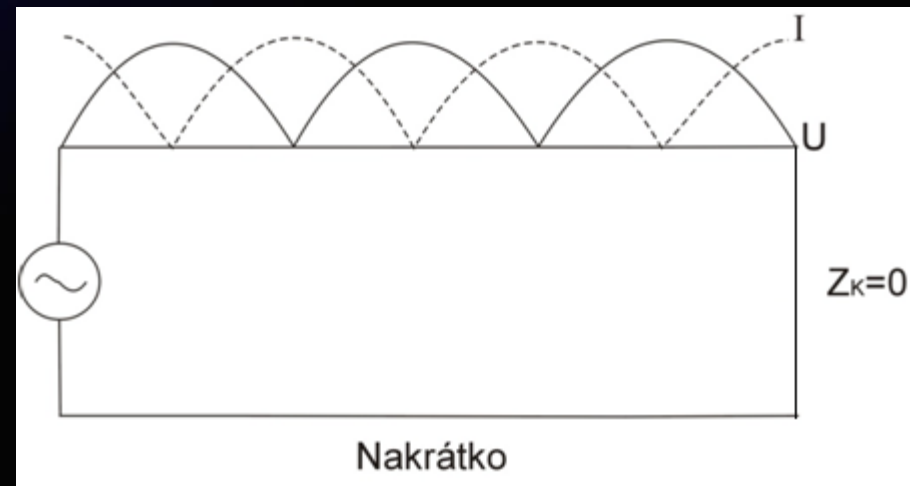
- **Vedenie naprázdno** - má na konci maximum napät'ovej a minimum prúdovej vlny

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

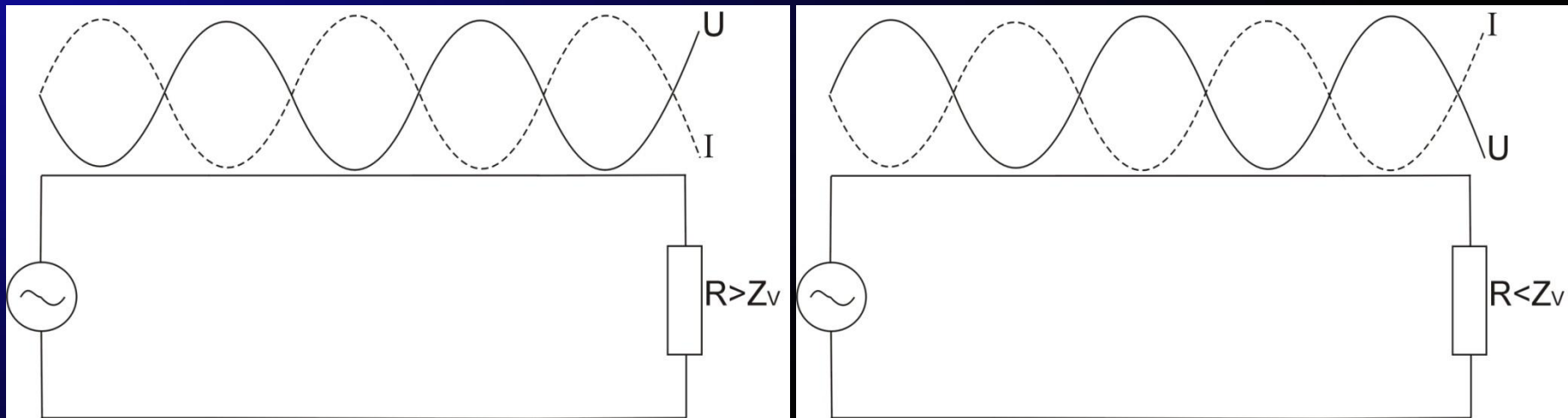


- **Vedenie nakrátko** - má na konci minimum napät'ovej a maximum prúdovej vlny

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

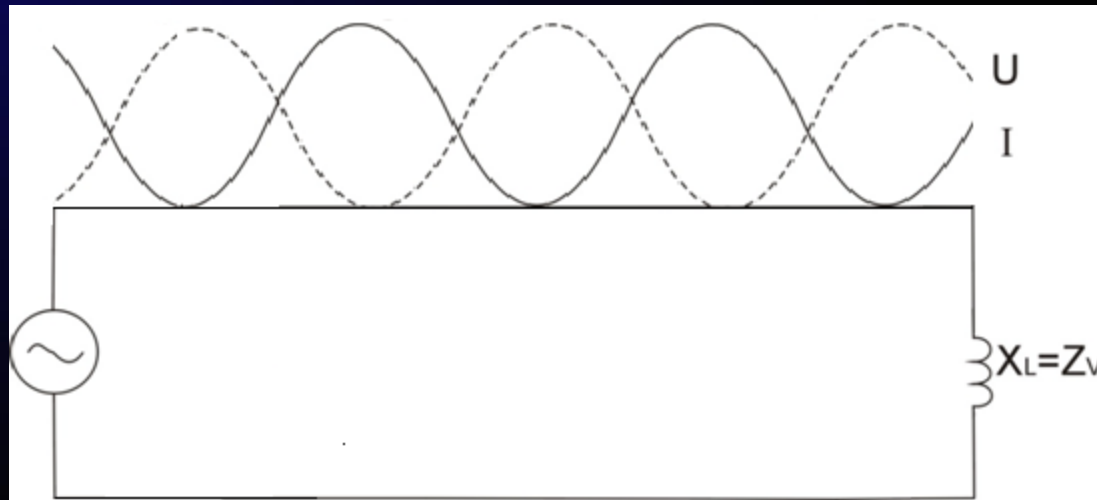
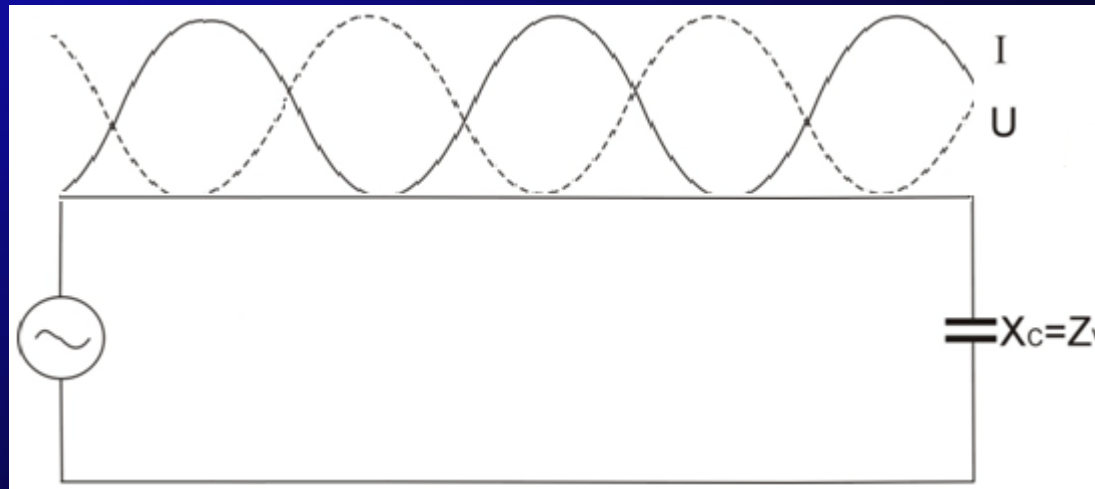


- **Vedenie zakončené reálnou impedanciou (rezistorom) - keď $R \neq Z_v$, vznikajú na vedení stojaté vlny**
 - keď je $R > Z_v$, rozloženie stojatých vln pozdĺž vedenia sa blíži stojatým vlnám pre **vedenie naprázdno**
 - keď je $R < Z_v$, rozloženie stojatých vln sa blíži stojatým vlnám pre **vedenie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



■ Vedenie zakončené reaktanciou (X_C a X_L)

- v oboch 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 nerezonujúce (len postupujúca vlna)

NEREZONUJÚCE VF VEDENIE

- používame na prenos vf energie malých a veľkých výkonov
- prenos sa uskutočňuje postupujúcimi vlnami - PSV čo najmenší (1,2)
- 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 prispôbovací obvod, ktorý transformuje impedanciu antény na vlnový odpor vedenia
- impedančné prispôsobenie musí byť aj na strane vysielača

REZONUJÚCE 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 sú 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 polovín - vstupná impedancia sa rovná zťažovacej impedancii

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

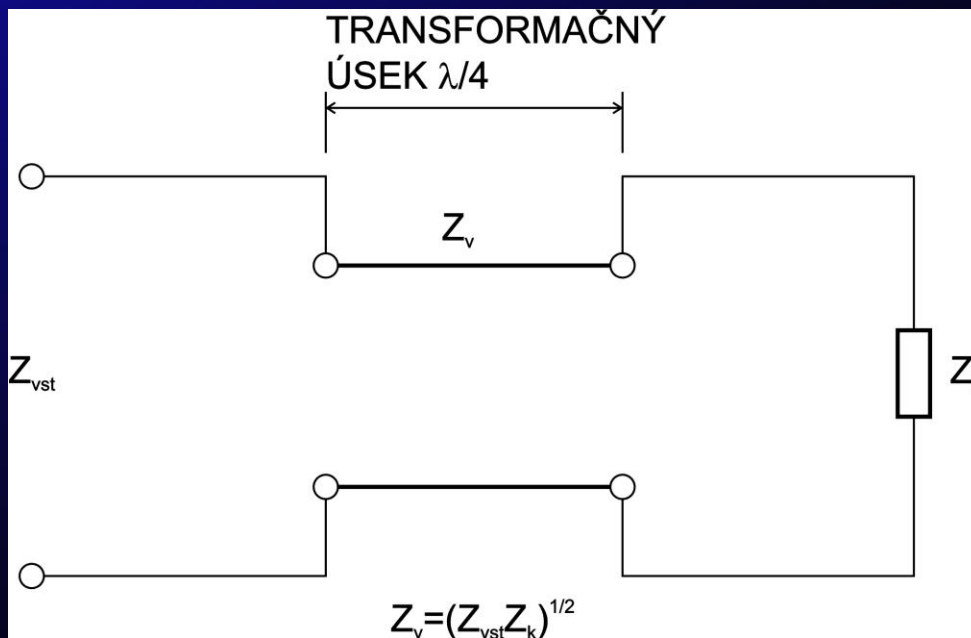
$$Z_{vst} = Z_k$$

- ak sa **dĺžka vedenia rovná nepárny násobkom štvrtvlny** - 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 $(n+1)\lambda/4$ **prispôsobuje** zaťažovaciu impedanciu Z_k vstupnej impedancii Z_{vst}
- vlnová impedancia Z_v štvrtvlnového vedenia (alebo jeho násobok $(n+1)$) **tvorí** pritom geometrický stred



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

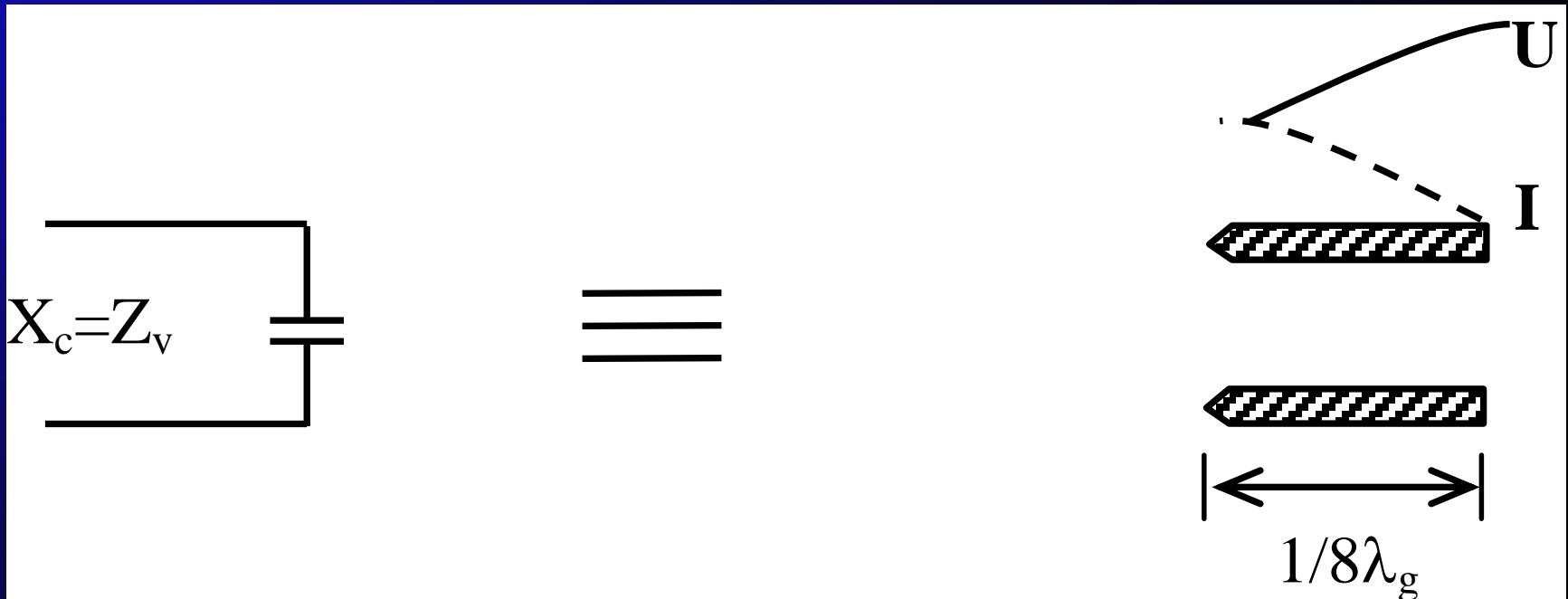
Transformácia impedancie vedením dĺžky $\lambda / 4$

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

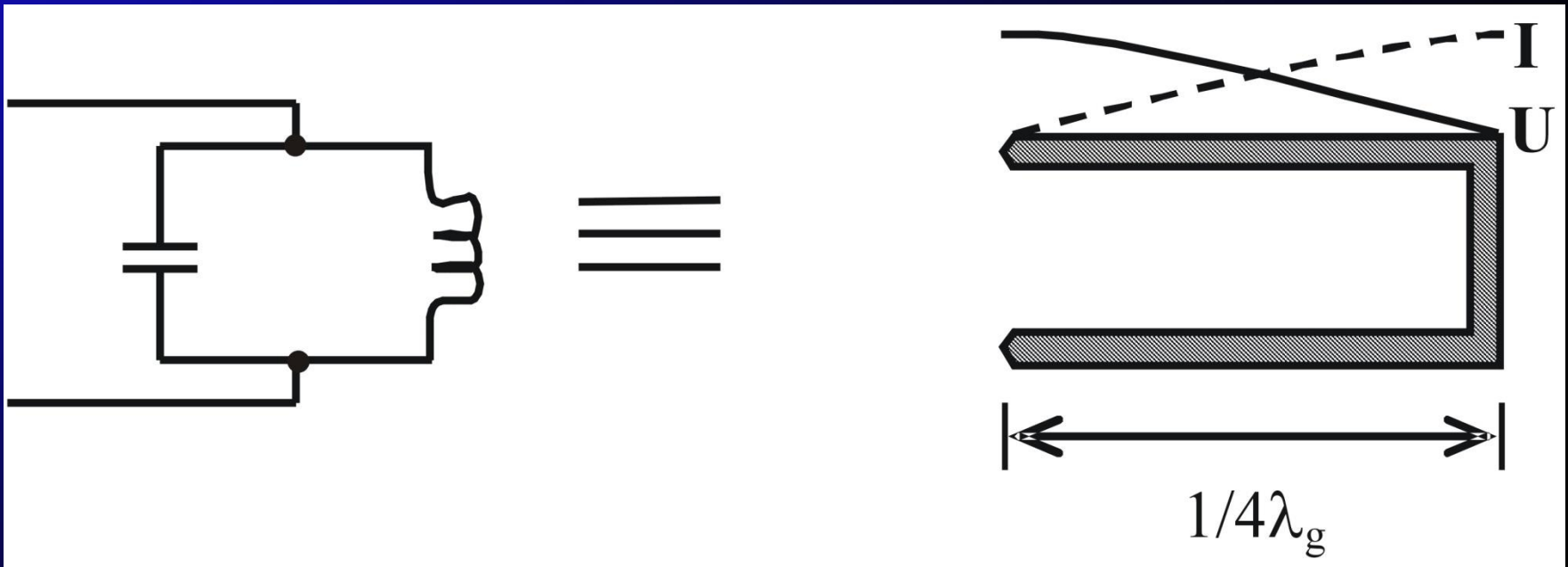
- úsek skratovaného vedenia, kratší ako $1/4 \lambda_g$ sa pre generátor javí ako indukčnosť
 - keď je dĺžka tohto úseku vedenia presne $1/8 \lambda_g$, potom platí $X_L = Z_V$



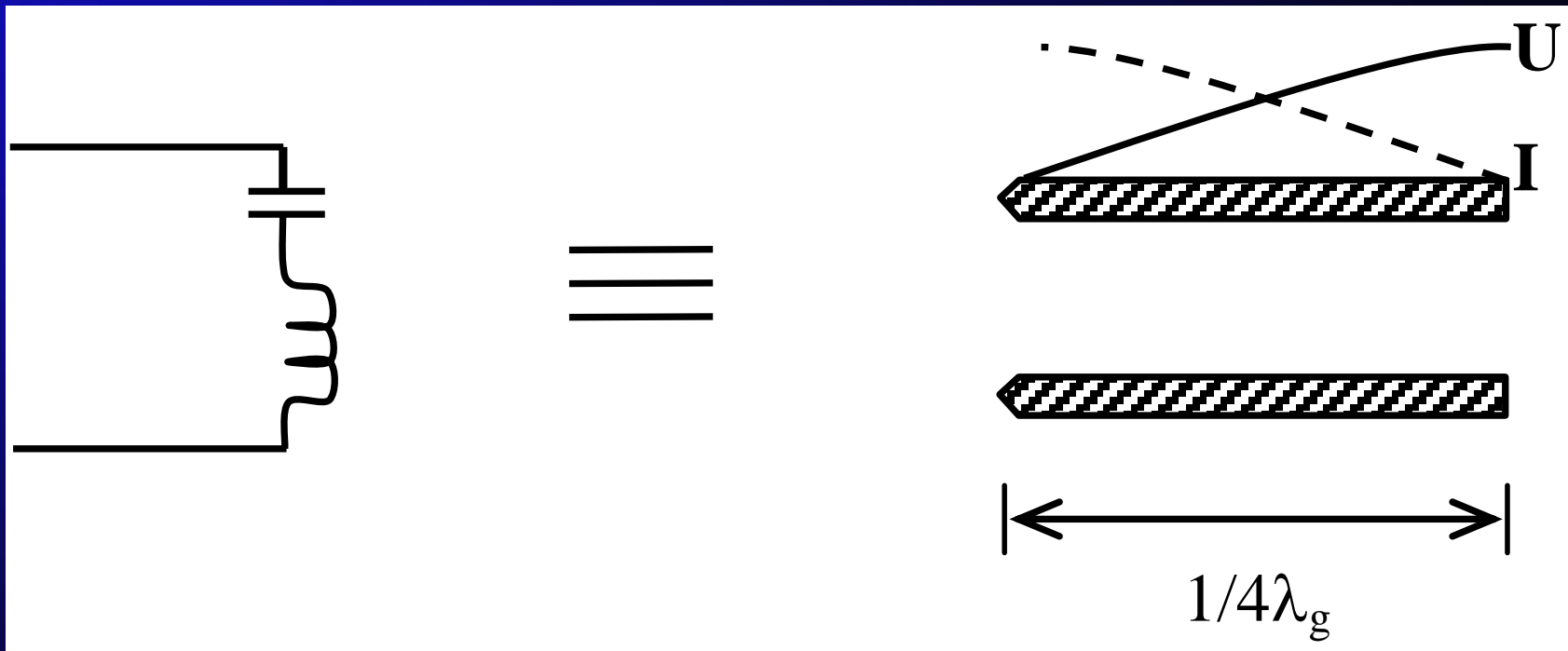
- úsek otvoreného vedenia, **kratší** ako $1/4 \lambda_g$ sa pre generátor javí ako **kapacita**
 - keď je dĺžka tohto úseku vedenia presne $1/8 \lambda_g$, potom platí $X_C = Z_V$



- 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



Témy na zapamätanie

- 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
- Spôsoby 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

Kontrolné otázky

- Načo sa používa „VF“ vedenie pri anténach?
- 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 „ γ “ elm vlny a popíšte jednotlivé členy.
- Napíšte vzťahu pre vlnovú impedanciu „ Z_v “.
- Napíšte vzťahu pre vlnovú impedanciu „ Z_v “ bezstratového vedenia.
- Uvedte 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 štvrt'vlny vedenie nakrátko?
- Aký charakter má pri nepárnom násobku štvrt'vlny 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 štvrt'vlny vedenie naprázdno?
- Aký charakter má pri nepárnom násobku štvrt'vlny 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 štvrt'vlnového 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

■ Značky:

- α – miera tlmenia
- β – miera fázového posunu
- γ – miera šírenia
- λ - vlnová dĺžka
- Z_v - vlnová impedancia

Ďakujem za pozornosť