

né impulzy i sa privádzajú do miestneho dekódera, ktorý vytvorí ten istý signál, aký má byť dekódovaný v mieste príjmu. V porovnávači sa odčíta signál D od signálu správy s . Ak je rozdiel ($D - s$) kladný, v tom ktorom časovom okamihu, nevyšle sa žiadny impulz a D sa zväčší o jeden skok. Keď je rozdiel ($D - s$) záporný, vyšle sa impulz, ktorý sa privedie do miestneho dekódera a spôsobí zmenšenie signálu D o jeden skok.

Pri modulácii delta znamená impulz to, že treba amplitúdu dekódovanej správy zmenšiť o jeden skok alebo stupeň. Neprítomnosť impulzu v mieste, kde by mohol byť, naopak znamená, že amplitúdu dekódovanej správy treba zväčšiť o jeden stupeň. Sled impulzov teda vyznačuje iba zmenu signálu, umožňuje obnoviť signál akýmsi postupným približovaním. Odtiaľ je aj názov tejto modulácie, modulácia delta, t. j. prírastková modulácia. Odolnosť voči poruchám je veľmi vysoká, lebo prítomnosť aj skreslených impulzov sa môže ľahko spracovať.

6 VYSOKOFREKVENČNÉ VEDENIE

6.1 ZÁKLADNÉ POJMY

Vysokofrekvenčné vedenia sa používajú na prenos vysokofrekvenčnej energie zo zdroja do záťaže. Úlohou vysokofrekvenčného (VF) vedenia je dopraviť túto energiu s najmenšími stratami. Základnou vlastnosťou vysokofrekvenčného vedenia je, že jeho elektrické parametre, t. j. odpor, indukčnosť, vodivosť a kapacita sú rozložené pozdĺž celého vedenia, na rozdiel od doteraz známych obvodov, pri ktorých elektrické parametre sa sústredili do osobitných prvkov. Obvody s rozloženými parametrami môžeme rozdeliť:

- a) na obvody alebo vedenia s rovnomerne rozloženými parametrami (homogénne),
- b) na obvody s nerovnomerne rozloženými parametrami (nehomogénne).

V ďalšom sa budeme zaoberať len homogénnym vysokofrekvenčným vedením. Pri takomto vedení jeho základné charakteristické veličiny definujeme na jednotku dĺžky vedenia (napr. na 1 meter). Základné veličiny vedenia v pozdĺžnom smere sú odpor (R) a indukčnosť (L), v priečnom smere vodivosť (G) a kapacita (C). Keď chceme poznať hodnotu týchto veličín pre určitý úsek vedenia s dĺžkou l , musíme ich rozmer daný v Ω/m , H/m , S/m a F/m násobiť dĺžkou vedenia. Homogénne vedenie sa skladá z dvoch paralelných vodičov, pričom prierez vodiča, vzdialenosť vodičov a izolačný materiál obklopujúci vodiče má rovnaké hodnoty po celej dĺžke vedenia. Samotné vodiče nemusia byť z rovnakého materiálu a nemusia mať rovnaký prierez. Prierezové konfigurácie rôznych druhov homogénnych vedení, ktoré sa používajú v technickej praxi, sú uvedené na obr. 6.1.

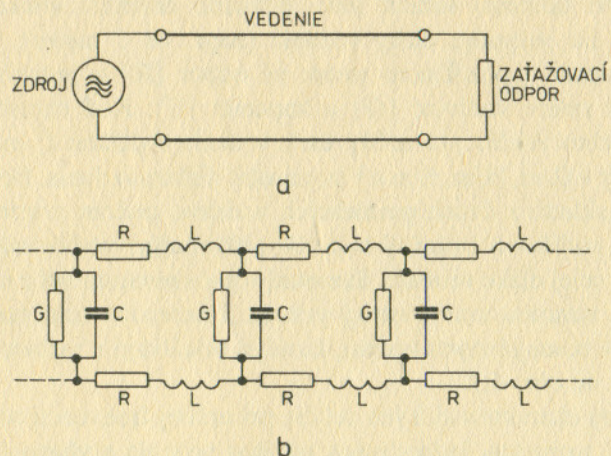
Hodnoty charakteristických veličín pri určitej frekvencii sú dané len materiálom, rozmermi jednotlivých vodičov vedenia a vlastnosťami dielektrika, v ktorom sú tieto uložené. Nezávisia od napätia a prúdu, takže



Obr. 6.1. Prierezové konfigurácie rôznych druhov homogénnych vedení

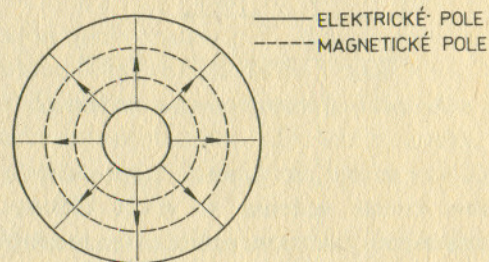
vedenie je vlastne lineárny pasívny obvod. Náhradná schéma vedenia je uvedená na obr. 6.2.

Prúdy vo vedení vytvárajú magnetické pole okolo vodiča. Indukčnosť na jednotku dĺžky je mierou energie nazhromaždenej magnetickým poľom na jednotku dĺžky. Vo vedení vznikajú straty pretekaním prúdu vo vodičoch, činný odpor na jednotku dĺžky je mierou týchto strát. Rozdiel potenciálov medzi vodičmi vytvára elektrické pole, kapacita v pričnom smere na jednotku dĺžky je mierou energie nazhromaždenej v elektrickom



Obr. 6.2. Homogénne vedenie a jeho náhradná schéma

poli. Straty vzniknuté v prostredí (v izolante) medzi dvoma vodičmi sú vyjadrené vodivosťou na jednotku dĺžky. Vodivostný prúd, ktorý tečie medzi dvoma vodičmi ako funkcia potenciálového rozdielu medzi nimi, znižuje celkový prúd smerujúci k záťaži vedenia.



Obr. 6.3. Transverzálne elektromagnetické vlnenie (TEM) v súsovom vedení

Pretekajú prúdu vo vedení a vytváranie napätia je sprevádzané elektromagnetickým poľom. Elektrické a magnetické pole pozdĺž vodiča je kolmé na vodič v celej jeho dĺžke. Takéto pole sa nazýva transverzálne elektromagnetické pole (TEM). Elektromagnetické pole pre TEM spôsob šírenia v súsovom (koaxiálnom) vedení je znázornené na obr. 6.3. Vlnenie sa šíri vedením od najnižších frekvencií, teoreticky od nuly. Zvyšovaním frekvencie straty na vedení narastajú. V oblasti centimetrových vln sa už nepoužívajú dvojvodičové vedenia, ale vlnovody.

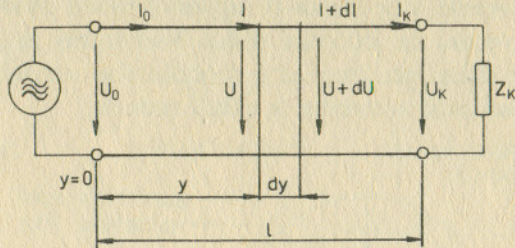
6.2 VLASTNOSTI VYSOKOFREKVENČNÝCH VEDENÍ

6.2.1 Diferenciálne rovnice homogénneho vedenia

Pre úsek vedenia znázornený na obr. 6.4 vzťahy medzi prúdom a napätím, ktoré sa na vedení rozložia, vyjadrujú základné rovnice homogénneho vedenia:

$$\frac{dU}{dy} = -(R + j\omega L)I \quad (6.1)$$

$$\frac{dI}{dy} = -(G + j\omega C)U \quad (6.2)$$



Obr. 6.4. Úsek dlhého homogénneho vedenia

Rovnica (6.1) vyjadruje, že pomer zmeny vektora napätia pozdĺž vedenia v určitom mieste vedenia sa rovná sériovej impedancii na jednotku dĺžky, násobenej vektorom prúdu v tomto mieste. Rovnica (6.2) vyjadruje, že pomer zmeny vektora prúdu pozdĺž vedenia sa v určitom mieste vedenia rovná súčinu admitancie na jednotku dĺžky a vektoru napätia v mieste, ktoré berieme do úvahy.

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. Výsledky riešenia sú

$$U_{(y)} = \frac{U_0 + I_0 Z_v}{2} e^{-\gamma y} + \frac{U_0 - I_0 Z_v}{2} e^{+\gamma y} \quad (6.3)$$

$$I_{(y)} = \frac{U_0 + I_0 Z_v}{2 Z_v} e^{-\gamma y} - \frac{U_0 - I_0 Z_v}{2 Z_v} e^{+\gamma y} \quad (6.4)$$

Z týchto rovníc je zrejmé, že vlna napätia a prúdu v ľubovoľnom mieste vedenia sa skladá z dvoch častí, a to zo vstupujúcej vlny napätia, príp. prúdu, a z odrazenej vlny napätia, príp. prúdu. Členy pri výraze $e^{-\gamma y}$ vyjadrujú veľkosť vstupujúcej vlny, členy pri výraze $e^{+\gamma y}$ vyjadrujú veľkosť odrazenej vlny napätia a prúdu. Po tejto úvahe rovnice (6.3) a (6.4) môžeme prepísať do tvaru

$$U_{(y)} = U_1 e^{-\gamma y} + U_2 e^{+\gamma y} \quad (6.5)$$

$$I_{(y)} = I_1 e^{-\gamma y} - I_2 e^{+\gamma y} \quad (6.6)$$

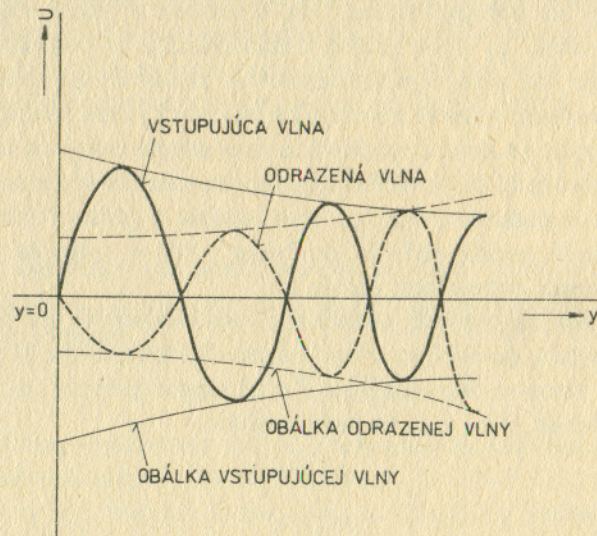
Výraz $U_1 e^{-\gamma y}$ reprezentuje vlnu harmonického napätia s veľkosťou U_1 v bode $y=0$, ktorá postupuje v smere zväčšujúcej sa hodnoty y

s fázovou rýchlosťou $v = \frac{\omega}{\beta}$, pričom exponenciálne znižuje svoju amplitúdu počas postupu podľa výrazu $e^{-\gamma y}$. Podobne $U_2 e^{+\gamma y}$ reprezentuje vlnu harmonického napätia s veľkosťou U_2 pri $y=0$, ktorá postupuje v smere znižujúcej sa hodnoty y fázovou rýchlosťou $v = \frac{\omega}{\beta}$, s amplitúdou, ktorá exponenciálne závisí podľa výrazu $e^{+\gamma y}$. Z uvedeného vyplýva, že U_1 je amplitúda vstupujúcej vlny, keď odchádza z bodu $y=0$, U_2 je amplitúda odrazenej vlny, keď prichádza do bodu $y=0$. Súčet U_1 a U_2 dáva napätie na vstupných svorkách vedenia (obr. 6.5). Všetky úvahy, ktoré sa týkajú napäťovej vlny, platia aj pre prúdovú vlnu, lebo rovnica (6.6) má presne ten istý tvar ako rovnica (6.5).

Veľičina γ , ktorá sa vyskytuje v rovniciach (6.5) a (6.6), udáva mieru šírenia vlny na homogénnom vedení

$$\gamma = \sqrt{\alpha y} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (6.7)$$

Všeobecne v ustálenom stave signálu na vedení, ktorý sa časom mení



Obr. 6.5. Vstupujúca a odrazená vlna na vedení

harmonicky, miera šírenia je komplexná veličina. Môžeme ju vyjadriť v tvare

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (6.8)$$

kde α je miera tlmenia,

β — miera fázového posunu homogénneho vedenia.

Vlnová impedancia Z_v , ďalšia dôležitá veličina pre každé vedenie, je daná vzťahom

$$Z_v = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (6.9)$$

6.2.2 Postupujúca a odrazená vlna na vedení

Z uvedeného rozboru 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 vysokofrekvenčné 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 prispôsobená 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. Je to vtedy, ak vedenie je buď nekonečne dlhé, alebo ak je na konci zakončené vlnovou impedanciou Z_v . V tomto prípade $U_2=0$, $I_2=0$ a potom rovnice (6.5) a (6.6) budú mať tvar

$$U = U_1 e^{-\gamma y} \quad (6.10)$$

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

To znamená, že na vedení je len postupujúca vlna.

6.2.3 Tlmenie a fázový posun

Napätová a prúdová vlna na VF vedení je tlmená vplyvom strát vedenia. Priebeh tlmenia pozdĺž vedenia je charakterizovaný výrazom $e^{-\alpha y}$, kde 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 napätovej a prúdovej vlny po vedení v smere narastajúcej hodnoty y fázový posun medzi napätím a prúdom sa mení. Zmena fázy pre určité vedenie je daná mierou fázového posunu, 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, na ktorej sa mení fáza o 2π radiánov, nazýva vlnová dĺžka. Keď vlnovú dĺžku označíme λ , potom dostávame vzťah $2\pi = \beta\lambda$ a z toho

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (6.11)$$

Výpočet veľkosti β pre prenosové vedenie je základnou úlohou pre analytické určenie fázovej rýchlosti a vlnovej dĺžky harmonicky sa meniaceho signálu napätia a prúdu pre akúkoľvek uhlovú frekvenciu ω (rad/s). Pre harmonické vlnenie každého druhu je fázová rýchlosť

$$v_t = \frac{\omega}{\beta} \quad (6.12)$$

Keď elektrické vlastnosti vedenia sú dané pomocou rozložených parametrov R , L , G a C pre určitú uhlovú frekvenciu ω , α a β , musí sa vypočítať z rovnice

$$\alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (6.13)$$

Táto úloha je pomerne zložitá. Zjednoduší sa, keď berieme do úvahy bezstratové vedenie, t. j. predpokladáme, že $R=0$, $G=0$. Za tohto predpokladu na vedení nedochádza k tlmeniu prenášanej energie. K takémuto vedeniu sa veľmi približujú vedenia, ktoré pracujú na veľmi vysokých frekvenciách, keď ωL a ωC nadobúdajú také veľké hodnoty, že

R a G môžeme v porovnaní s nimi zanedbať. Rýchlosť šírenia vlnenia po vedení je v tomto prípade blízka rýchlosti šírenia svetla. Po zanedbaní R a G v rovnici (6.13) je miera tlmenia $\alpha = 0$ a miera fázového posunu $\beta \doteq \omega \sqrt{LC}$.

6.2.4 Vlnová impedancia bezstratového vedenia

Z rovnice (6.10) vyplýva, že pomer veľkosti U a I pri vedení, na ktorom nie sú odrazené vlny, je v ľubovoľnom mieste vedenia vždy ten istý, pretože výrazy $e^{-\gamma x}$ sú identické v oboch rovniciach.

Keď berieme do úvahy bezstratové vedenie, energia magnetického poľa v ľubovoľnom bode vedenia sa rovná energii elektrického poľa. Z tejto úvahy vyplýva vzťah

$$\frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} CU^2 \quad (6.14)$$

kde L a C sú parametre vedenia. Riešením tejto rovnice dostaneme

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

Pomer $\frac{U}{I}$ pri bezstratovom vedení nazývame vlnovou impedanciou vedenia Z_v .

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6.15)$$

Hoci vlnová impedancia Z_v vysokofrekvenčného 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 Ω , 300 Ω a pod.

6.2.5 Vstupná impedancia vedenia

Použitím hyperbolických funkcií môžeme rovnice (6.3) a (6.4) upraviť do tvaru

$$U = U_0 \cos h\gamma y - I_0 Z_v \sin h\gamma y \quad (6.16)$$

$$I = -\frac{U_0}{Z_v} \sin h\gamma y + I_0 \cos h\gamma y \quad (6.17)$$

Keď dosadíme za dĺžku vedenia l , ktoré berieme do úvahy, dostaneme vzťah medzi napätím U_0 a prúdom I_0 na začiatku vedenia a napätím U_k a prúdom I_k na konci vedenia

$$U_0 = U_k \cos h\gamma l + I_k Z_v \sin h\gamma l \quad (6.18)$$

$$I_0 = -\frac{U_k}{Z_v} \sin h\gamma l + I_k \cos h\gamma l \quad (6.19)$$

Takto upravené rovnice môžeme s výhodou použiť na výpočet vstupnej impedancie bezstratového VF vedenia, výpočet ktorej sa veľmi často vyskytuje pri riešení vysokofrekvenčných vedení. Rovnice (6.18) a (6.19) môžeme ešte ďalej zjednodušiť, keď uvažujeme o bezstratovom vedení, ktorého konštanta prenosu $\gamma = j\beta$. Potom

$$U_0 = U_k \cos h\beta l + Z_v I_k \sin h\beta l \quad (6.20)$$

$$I_0 = I_k \cos h\beta l + j \frac{U_k}{Z_v} \sin h\beta l \quad (6.21)$$

Úpravou týchto rovníc dostaneme pre vstupnú impedanciu vedenia zakončeného impedanciou Z_k výraz

$$Z_{\text{vst}} = \frac{U_0}{I_0} = Z_v \frac{Z_k + jZ_v \operatorname{tg} \beta l}{Z_v + jZ_k \operatorname{tg} \beta l} \quad (6.22a)$$

alebo v inej úprave

$$Z_{\text{vst}} = Z_v \frac{Z_k \cos \beta l + jZ_v \sin \beta l}{Z_v \cos \beta l + jZ_k \sin \beta l} \quad (6.22b)$$

Ako vidieť z tejto rovnice, vstupnú impedanciu vedenia v podstatnej miere ovplyvňuje charakteristická impedancia Z_v a záťažovacia impedancia Z_k .

6.2.6 Stojaté vlny na vedení

Keď na koniec vedenia pripojíme spotrebič, ktorého impedancia Z_k sa blíži k vlnovej impedancii Z_v , no predsa sa líši, na vedení vznikne priama vlna (vstupujúca), ktorej veľkosť označme ako U_{vst} , a odrazená vlna $U_{\text{od.}}$. Neprispôsobenosť záťaže k charakteristickej impedancii vedenia má za následok, že časť vysokofrekvenčnej energie sa vracia odrazenou

vlnou. Pomer odrazenej vlny ku vstupujúcej vlne napätia a prúdu na konci vedenia nazývame činiteľom odrazu (reflexným činiteľom)

$$r = \frac{U_{\text{kod}}}{U_{\text{kvs}}} = -\frac{I_{\text{kod}}}{I_{\text{kvs}}} \quad (6.23)$$

Reflexný činiteľ pre praktické výpočty môžeme upraviť tak, aby sa mohol vypočítať pomocou vlnovej impedancie Z_v a zakončovacej impedancie Z_k . Postup výpočtu je založený na poznatku, že charakteristická impedancia v ľubovoľnom bode vedenia je daná pomerom napätia a prúdu v tomto bode. Na konci vedenia pre vstupujúcu vlnu napätia a prúdu môžeme napísať

$$Z_v = \frac{U_{\text{kvs}}}{I_{\text{kvs}}} \quad (6.24)$$

Pre impedanciu na konci vedenia platí

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{U_{\text{kvs}} + U_{\text{kod}}}{I_{\text{kvs}} + I_{\text{kod}}} = \frac{U_{\text{kvs}}}{I_{\text{kvs}}} \cdot \frac{1 + \frac{U_{\text{kod}}}{U_{\text{kvs}}}}{1 + \frac{I_{\text{kod}}}{I_{\text{kvs}}}}$$

Úpravou a dosadením z rovnice (6.23) a (6.24)

$$Z_k = Z_v \frac{1+r}{1-r} \quad (6.25)$$

Keď z tejto rovnice vypočítame r , dostaneme

$$r = \frac{Z_k - Z_v}{Z_k + Z_v} \quad (2.26)$$

Ak delíme čitateľa a menovateľa Z_v , potom

$$r = \frac{\frac{Z_k}{Z_v} - 1}{\frac{Z_k}{Z_v} + 1} = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \quad (6.27)$$

Pomer $\frac{Z_k}{Z_v}$ sa nazýva pomernou (normalizovanou) impedanciou.

Tento tvar výrazu pre činiteľa odrazu sa používa pri konštrukcii diagramov na riešenie vysokofrekvenčných vedení. Činiteľ odrazu, ako vidieť z poslednej rovnice, je jednoznačne určený pomerom zaťažovacej impedancie Z_k a vlnovej impedancie Z_v . Extrémne hodnoty dosiahne činiteľ odrazu v tých 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).

Pri neprispôbenom vedení vzniká interferenciu 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 . Vznikom stojatého vlnenia následkom neprispôbenia klesá prenos vĺ energie do záťaže. Pracovné podmienky prenosu energie môžeme vyjadriť pomerom stojatých vĺn (PSV) napätia alebo prúdu (maximálnej a minimálnej hodnoty)

$$PSV = \left| \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}} \right| = \left| \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{min}}} \right| \quad (6.28)$$

PSV je číslo vždy väčšie ako jedna, v ideálnom prípade môže sa rovnať jednej. Extrémne hodnoty PSV sú:

- keď $U_{\text{max}} = U_{\text{min}}$ $PSV = 1$ (dokonalé prispôbenie),
- keď $U_{\text{min}} = 0$ $PSV = \infty$ (vedenie naprázdno, nakrátko).

V praktických aplikáciách sa snažíme navrhnúť a udržať v prevádzke vĺ vedenie v prispôbenom stave, t. j. tak, aby sa $Z_v = Z_k$. V skutočnosti je to ideálny prípad, ku ktorému sa môžeme len priblížiť. Napríklad pri vysokofrekvenčných vedeniach televíznych vysielačích antén sa docieľi $PSV < 2$. Odrazy na vedení nielen znižujú prenášaný výkon, ale majú aj rušivé účinky.

6.3 SPÔSOBY ZAŤAŽENIA VYSOKOFREKVENČNÝCH VEDENÍ

Z hľadiska veľkosti zaťažovacej impedancie Z_k , môžeme rozlíšiť štyri dôležité prípady ukončenia vĺ vedenia. Tieto sú: