

1. Vedenie zaťažené impedanciou, ktorá sa rovná jeho vlnovej impedancii.
2. Vedenie na konci spojené do skratu — nakrátko.
3. Vedenie na konci otvorené — naprázdno.
4. Vedenie zaťažené impedanciou, ktorá sa nerovná jeho vlnovej impedancii.

6.3.1 Vedenie zaťažené impedanciou, ktorá sa rovná jeho vlnovej impedancii

Tento prípad nastáva vtedy, keď $Z_k = Z_v$. Celá vysokofrekvenčná energia, ktorá sa po vedení dostala až na jeho koniec, sa odovzdá do zaťažovacej impedancie. Na konci vedenia nenastáva žiadny odraz, to znamená, že činiteľ odrazu $r = 0$. Takémuto prípadu hovoríme, že vedenie je prispôbené k záťaži.

Vstupná impedancia vedenia podľa vzťahu (6.22), keď $Z_k = Z_v$, bude

$$Z_{vst} = Z_v$$

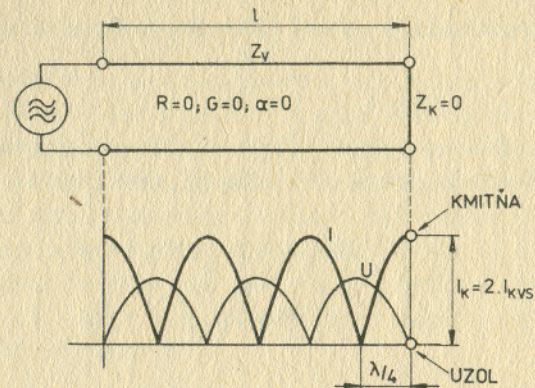
Keď berieme do úvahy bezstratové vedenie ($\alpha = 0$) a napätie na začiatku vedenia sa mení v čase harmonicky s frekvenciou ω , okamžitú hodnotu napätia a prúdu na ktoromkoľvek mieste na vedení možno vyjadriť v tvare

$$\begin{aligned} U &= U_0 e^{-j(\omega t + \beta y)} \\ I &= I_0 e^{-j(\omega t + \beta y)} \end{aligned} \quad (6.29)$$

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

6.3.2 Vedenie na konci nakrátko

Keď je vedenie na konci spojené nakrátko, $Z_k = 0$. 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, čo má za následok, že vedením sa neprenáša žiaden činný výkon. Na konci vedenia je uzol napäťovej stojatej vlny a kmitňa prúdovej stojatej vlny. Vlna napätia a prúdu je posunutá o $\lambda/4$ (obr. 6.6). Uzatvoreným obvodom tečie prúd, vlna prúdu v mieste skratu fázu nemení, kým odrazená vlna napätia v mieste nulovej záťaže mení fázu proti priamej vlne o 180° .



Obr. 6.6. Vedenie nakrátko

Pretože na konci vedenia nastáva úplný odraz, činiteľ odrazu $r = -1$ a $PSV = \infty$. Odrazená vlna prúdu sa sčítava s priamou vlnou prúdu v miestach rovnakej fázy, ale v iných bodoch, vzdialených o $\lambda/4$ vlny, sa odčítava. Maximá stojatej prúdovej vlny budú mať veľkosť

$$I_k = 2I_{kvS}$$

Minimá budú nulové. Vstupná impedancia vedenia nakrátko podľa vzťahu (6.22) keď $Z_v = 0$, bude

$$Z_{vst} = jZ_v \operatorname{tg} \beta l \quad (6.30)$$

Z tohto vzťahu je zrejmé, že vedenie nakrátko sa správa ako reaktancia, pričom charakter reaktancie bude závisieť od veľkosti argumentu βl , čiže od dĺžky vedenia. Vstupná impedancia bude mať induktívny charakter keď $\operatorname{tg} \beta l > 0$, čiže ak je splnená nerovnosť

$$2n \frac{\lambda}{4} < l < (2n + 1) \frac{\lambda}{4}; \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (6.31)$$

Vstupná impedancia bude mať kapacitný charakter, keď $\operatorname{tg} \beta l < 0$ a platí nerovnosť

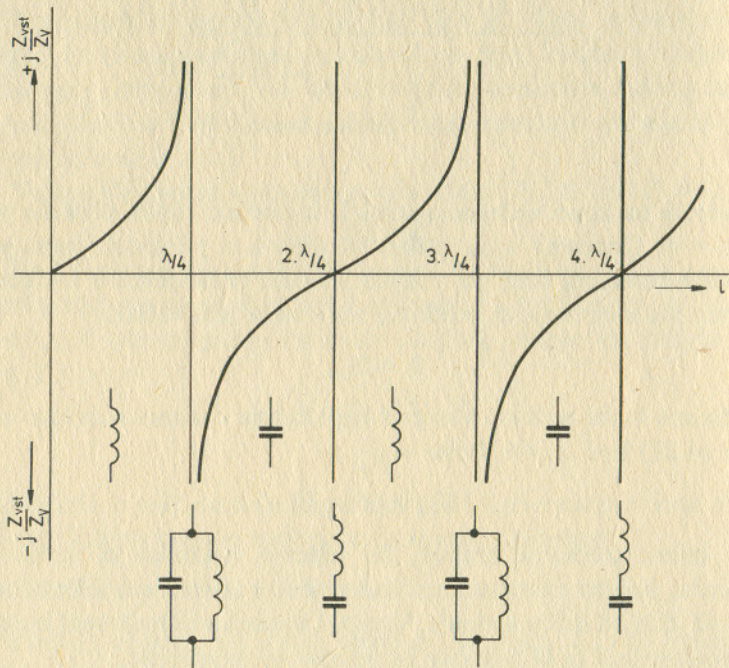
$$(2n - 1) \frac{\lambda}{4} < l < 2n \frac{\lambda}{4}; \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (6.32)$$

Vstupná impedancia je nulová ($Z_{vst} = 0$), keď

$$l = 2n \frac{\lambda}{4} \quad (6.33)$$

Pri takejto dĺžke sa vedenie správa ako sériový rezonančný obvod. Vstupná impedancia je nekonečne veľká ($Z_{vst} = \infty$), keď

$$l = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} \quad (6.34)$$

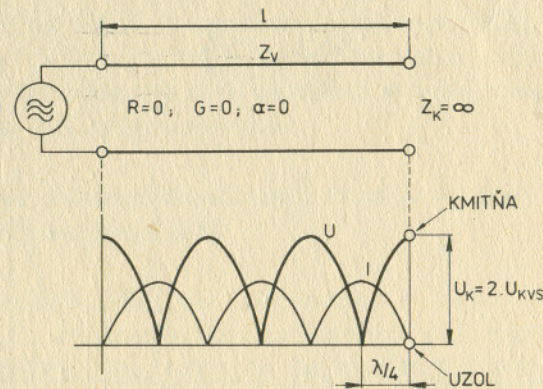


Obr. 6.7. Priebeh charakteru vstupnej impedancie vedenia nakrátko

Vedenie nakrátko sa správa ako sériový rezonančný obvod, keď jeho dĺžka sa rovná párnemu násobku štvrtvln; pri nepárnom násobku štvrtvln sa správa ako paralelný rezonančný obvod. Priebehy vstupnej impedancie vedenia nakrátko sú graficky znázornené na obr. 6.7.

6.3.3 Vedenie na konci naprázdno

Takéto vedenie je na konci otvorené, to znamená, že je zakončené impedanciou $Z_k = \infty$ (obr. 6.8). Ak pripojíme vedenie na zdroj striedavého prúdu, na vedení vznikne stojaté vlnenie ako v predchádzajúcom prípade, ale s tým rozdielom, že na konci vedenia je kmitňa napäťovej vlny a uzol prúdovej vlny. Maximá alebo minimá sú navzájom posunuté o $\lambda/4$. Na vedení nastáva úplný odraz, preto činiteľ odrazu $r = 1$, $PSV = \infty$. Na otvorenom konci vedenia má prúd nulovú hodnotu, a preto zaniká magnetické pole. Tento stav spôsobí vzrast napätia na dvojnásobok, maximum napäťovej vlny je



Obr. 6.8. Vedenie naprázdno

$$U_k = 2U_{kvs}$$

minimum napäťovej vlny je nulové. Napätie sa odráža vo fáze, prúd v protifáze.

Vstupná impedancia vedenia naprázdno podľa vzťahu (6.22), keď $Z_k = \infty$, bude

$$Z_{vst} = -jZ_v \cotg \beta l \quad (6.35)$$

I v tomto prípade ako pri vedení nakrátko vstupná impedancia sa správa ako obvod s premenlivou reaktanciou, v závislosti od dĺžky vedenia

naprázdno. Vstupná impedancia bude mať kapacitný charakter, keď $\cotg \beta l < 0$. Tento stav nastane pri tých dĺžkach vedenia, pre ktoré je splnená nerovnosť

$$2n \frac{\lambda}{4} < l < (2n + 1) \frac{\lambda}{4}; \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (6.36)$$

Vstupná impedancia bude mať induktívny charakter, keď $\cotg \beta l > 0$. Tento stav nastane pri vlnových dĺžkach

$$(2n - 1) \frac{\lambda}{4} < l < 2n \frac{\lambda}{4} \quad (6.37)$$

Vstupná impedancia je nulová ($Z_{\text{vst}} = 0$), keď

$$l = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} \quad (6.38)$$

Vstupná impedancia je nekonečne veľká ($Z_{\text{vst}} = \infty$), keď

$$l = 2n \frac{\lambda}{4} \quad (6.39)$$

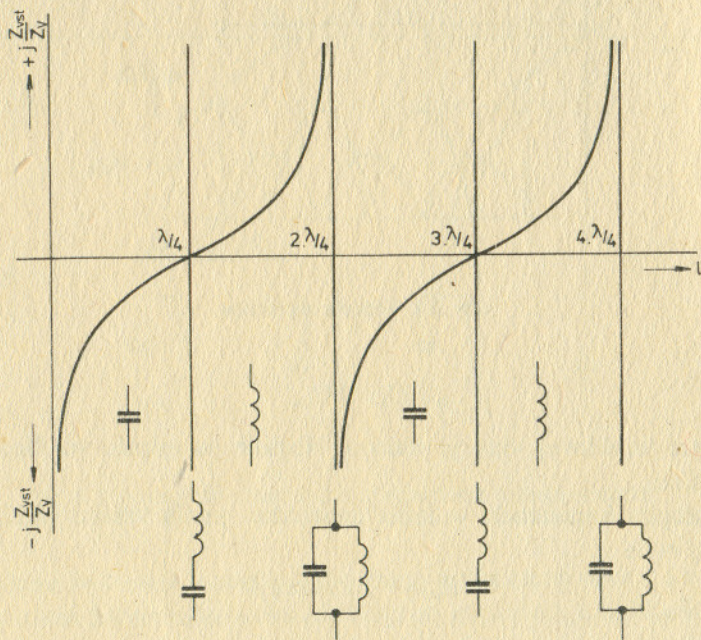
Vedenie naprázdno sa správa ako sériový rezonančný obvod pri dĺžkach, ktoré sa rovnajú nepárnemu násobku štvrtvlny, ako paralelný rezonančný obvod, keď jeho dĺžka sa rovná párnemu násobku štvrtvlny (obr. 6.9).

Priebeh vstupnej impedancie vedenia naprázdno a nakrátko bez matematickej interpretácie si môžeme predstaviť aj takto: V miestach, kde je kmitňa prúdu a uzol napätia, je impedancia veľmi malá — teoreticky nulová, tam kde je prúdový uzol a napätová kmitňa, je impedancia veľmi veľká — teoreticky nekonečná. Vstupná impedancia nenadobudne nikdy nulovú alebo nekonečne veľkú hodnotu zodpovedajúcu týmto extrémnym prípadom ukončenia vedenia, pretože vedenie má vždy určitý aj keď malý činný odpor.

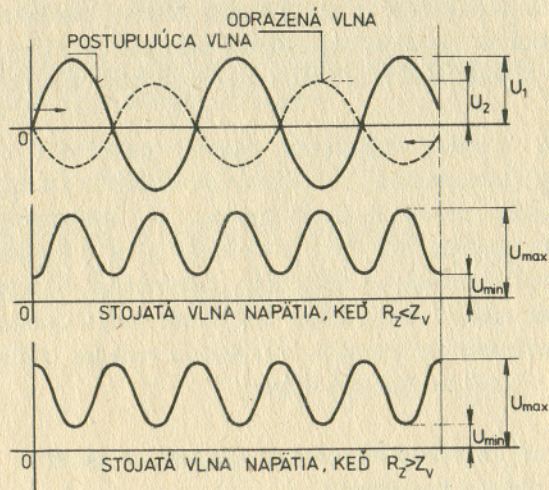
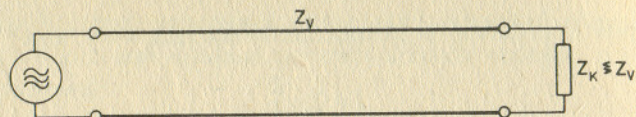
6.3.4 Vedenie zaťažené impedanciou, ktorá sa nerovná jeho vlnovej impedancii

Ak je vedenie ukončené impedanciou Z_k , ktorá je väčšia alebo menšia ako Z_v , na vedení vznikne postupujúca a aj stojatá vlna. Pretože amplitúda odrazenej vlny je menšia ako amplitúda postupujúcej vlny (čo závisí od stupňa neprispôbenosti) nevytvára sa pri interferencii uzol napätia alebo prúdu s nulovou hodnotou a kmitňa prúdu alebo napätia s dvojnásobnou amplitúdou vstupujúcej vlny. Vytvoria sa maximá a minimá stojatej vlny s amplitúdou úmernou stupňu neprispôbenosti (obr. 6.10). Na konci vedenia je vždy maximum napätia a minimum prúdu keď $Z_k > Z_v$, a naopak, minimum napätia a maximum prúdu keď $Z_k < Z_v$.

Vstupná impedancia takéhoto vedenia, ak neberieme do úvahy straty, sa vypočíta pomocou rovnice (6.22). Výpočet vstupnej impedancie Z_{vst} vysokofrekvenčného vedenia, ktoré je zakončené všeobecnou impedanciou Z_k , býva vzhľadom na zložitejší vzťah úloha dosť zdĺhavá. Podobne aj výpočet činiteľa odrazu a pomeru stojatých vln. Preto sa vytvorila grafická pomôcka, ktorú publikoval v r. 1939 P. H. Smith. Tento Smithov diagram umožňuje riešiť túto úlohu jednoduchšie, graficko-výpočtovým spôsobom.



Obr. 6.9. Priebeh charakteru vstupnej impedancie vedenia naprázdno



Obr. 6.10. Stojaté vlny na vedení, keď $Z_k \neq Z_v$

6.3.5 Použitie rezonujúcich a nerezonujúcich vedení

Stojaté vlnenie sa vytvára na vľ vedeniach konečnej dĺžky, ak je vedenie zakončené iným ako činným odporom, ktorý sa rovná vlnovej impedancii Z_v . Každé vedenie so stojatými vlnami sa nazýva rezonujúcim. Prispôbené vedenie je nerezonujúce. Obidva druhy vedení majú určité výhodné vlastnosti, ktoré sa využívajú v spojitosti s nimi v rádioelektronických zariadeniach.

— Nerezonujúce vľ vedenia používame na prenos vysokofrekvenčnej energie malých a veľkých výkonov. Prenos sa uskutoční postupujúcimi vlnami, preto PSV má byť čo najmenší. Ak nie sú stojaté vlny na vedení, vedenie je rovnomerne zafaržené. Keď sa pri neprispôbení vytvoria stojaté vlny, pri prenose väčších výkonov vzniká nebezpečenstvo preskokov v miestach kmitní napätí. Ak sa prenáša vľ vedením výkon vysielača do antény, musí byť medzi anténou a vedením prispôbovací obvod, ktorý transformuje impedanciu antény na vlnový odpor vedenia. Impedančné prispôbenie musí byť aj na strane vysielača.

— Rezonujúce vedenie naprázdno a nakrátko s dĺžkami, ktoré sa rovnajú násobkom $\lambda/4$, môžeme použiť na vytvorenie paralelného alebo sériového rezonančného obvodu s vysokou kvalitou. Takéto úseky vysokofrekvenčných vedení sa používajú ako rezonančné obvody v rozsahu decimetrových vľn.

— Rezonujúce vedenie nakrátko alebo naprázdno s dĺžkou $l < \lambda/4$ môžeme použiť ako reaktanciu induktívneho, príp. kapacitného charakteru. Takéto úseky vedenia sa používajú na vysokých frekvenciách ako veľmi dobrá náhrada cievok a kondenzátorov. V tejto frekvenčnej oblasti ťažko možno realizovať indukčnosť alebo kapacitu so sústredenými parametrami.

— Zo vzťahu pre vstupnú impedanciu vedenia dĺžky l (6.22) je zrejmé, že pre danú zafaržovaciu impedanciu Z_k možno na vstupe dosiahnuť ľubovoľnú vstupnú impedanciu vhodnou voľbou dĺžky $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ a za dĺžku vedenia l násobky polvln $n \frac{\lambda}{2}$, dostaneme výsledok, podľa ktorého

$$Z_{vst} = Z_k$$

Keď sa teda dĺžka vedenia rovná celistvému násobku polvln, vstupná impedancia sa rovná zafaržovacej impedancii.

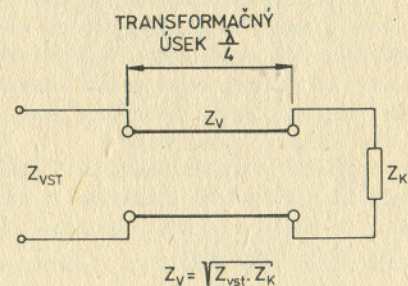
Ak na pripojenie zakončovacej impedancie použijeme vedenie, ktorého dĺžka je daná nepárnym násobkom štvrtvlny, argument trigonometrických funkcií vo vzorci (6.22b) bude mať tvar

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4} (n+1) = \frac{\pi}{2} (n+1) \quad (6.40)$$

a pre vstupnú impedanciu vysokofrekvenčného vedenia dostaneme výraz (po úprave a dosadení do rovnice (6.22b))

$$Z_{vst} = \frac{Z_v^2}{Z_k} \Rightarrow Z_v = \sqrt{Z_{vst} Z_k} \quad (6.41)$$

Tento výsledok je veľmi dôležitý, lebo naznačuje, že vedenie dlhé $\lambda/4$ alebo $(n+1) \lambda/4$ prispôbuje zafaržovaciu impedanciu Z_k vstupnej impedancii Z_{vst} . Vlnová impedancia Z_v štvrtvlnového vedenia (alebo jeho násobok $(n+1)$) tvorí pritom geometrický stred. Princíp tejto transformácie je zrejmy z obr. 6.11. Použitím štvrtvlnového transformátora možno na



Obr. 6.11. Transformácia impedancie vedením $\lambda/4$

hodnotu vlnového odporu napájača pretransformovať len nízke vstupné činné odpory (do 1000 Ω), pretože pre charakteristickú impedanciu $\frac{\lambda}{4}$ vedenia by vychádzali veľmi veľké hodnoty.

6.3.6 Smithov kruhový diagram

Základom pre konštrukciu tohto diagramu je rovnica (6.27). Činiteľa odrazu v komplexnom tvare môžeme vyjadriť rovnicou

$$r = u + jv \quad (6.42)$$

a normalizovanú impedanciu v komplexnom tvare rovnicou

$$\frac{Z_k}{Z_v} = \frac{R}{Z_v} + j \frac{x}{Z_v}; \quad Z_n = r_n + jx_n \quad (6.43)$$

Dosadením (6.42) a (6.43) do rovnice (6.27) dostaneme rovnicu pre činiteľa odrazu v komplexnom tvare

$$u + jv = \frac{r_n + jx_n - 1}{r_n + jx_n + 1} \quad (6.44)$$

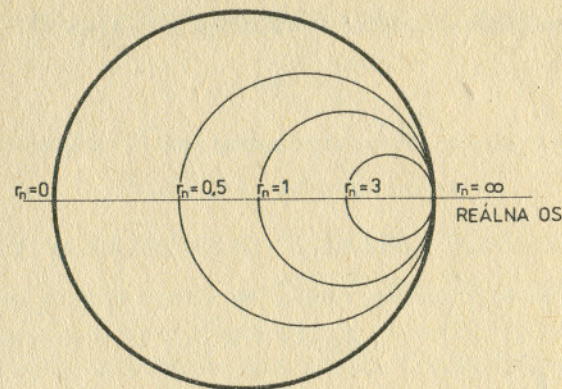
Úpravou a separáciou reálnej a imaginárnej časti tejto rovnice dostaneme dve rovnice kružnice, ktoré môžeme použiť pri konštrukcii kružníc konštantného r_n a konštantného x_n . Na obr. 6.12 sú znázornené kružnice konštantného normovaného odporu r_n s vyznačením reálnej osi a kružnice konštantnej normovanej reaktancie s vyznačením imaginárnej osi. Kružnice konštantného r_n a x_n tvoria podstatnú časť Smithovho diagramu. Okrem toho po obvode vonkajšej kružnice je stupnica počet vlnových dĺžok vynesená tak, že úplná kružnica zodpovedá jednej polvlně. Ak je vedenie dlhšie ako $\lambda/2$, prejdeme po kružnici toľkokrát, koľko polvln má dĺžka vedenia. Na tejto stupnici sa odčítava doprava pre smer od záťaže ku zdroju, doľava pre smer od zdroja ku záťaži. Pretože jedna celá otáčka v diagrame zodpovedá vlnovej dĺžke $\lambda/2$, striedanie znamienka po obvode imaginárnej osi je v súlade so striedaním induktívneho a kapacitného charakteru homogénneho vedenia.

Diagram obyčajne nemá kružnice, ktoré určujú činiteľa odrazu (r) alebo pomer stojatých vln (PSV), pretože by sa stal neprehľadný. Na odčítavanie r a PSV sa používa radiálne otočné pravítko, ktoré má stupnice pre tento účel. Stupnica pre činiteľa odrazu zodpovedá veľkosti polomeru diagramu, pričom uprostred je nula a na obvode 1. V strede kružnice má stupnica pre PSV hodnotu 1 a na obvode ∞ .

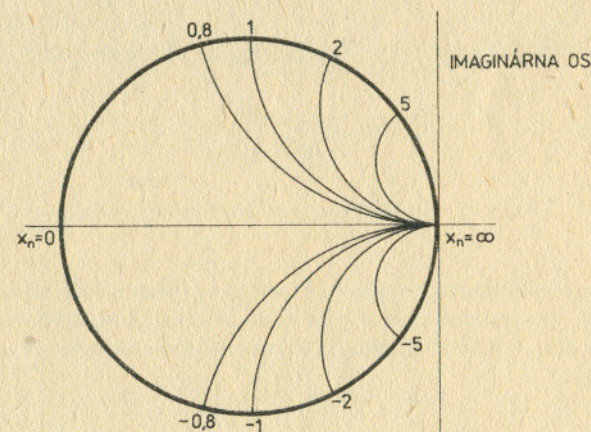
Prácu s diagramom si ukážeme na príklade (obr. 6.13). Vedenie s vlnovou impedanciou $Z_v = (100 - j 0) \Omega$ je zakončené zatažovacou impedanciou $Z_k = (50 - j 100) \Omega$. Vedenie je dlhé $l = 22$ m a pracuje na frekvencii $f = 60$ MHz. Vypočítajte Z_{vn} a r .

Výpočet normalizovanej zložky impedancie

$$r_n = \frac{50}{100} = 0,5 \quad x_n = -j \frac{100}{100} = -j 1$$



a



b

Obr. 6.12. Kružnice stáleho r_n (a) a stáleho x_n (b)

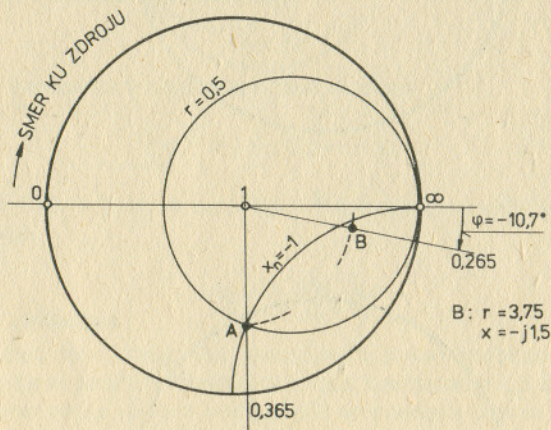
V diagrame nájdeme bod A, ktorý zodpovedá týmto hodnotám pomernej impedancie. Bod A spojíme so stredom diagramu a spojnicu predĺžime až ku stupnici počet vlnových dĺžok smerom ku zdroju, kde odčítame 0,365.

Dĺžku vedenia vyjadríme počtom vlnových dĺžok

$$\frac{l}{\lambda} = \frac{22}{5} = 4,4$$

Celkový počet vlnových dĺžok, o ktoré musíme postúpiť v diagrame, bude

$$0,365 + 4,4 = 4,765 = 9 \cdot 0,5 + 0,265$$



Obr. 6.13. Pomocná konštrukcia na riešenie príkladu

V diagrame postúpime na hodnotu 0,265 na stupnici vlnovej dĺžky od nuly smerom ku zdroju a spojíme ju so stredom. Bod A prenieseme oblúkom okolo stredy na túto spojnicu a dostaneme bod B, v ktorom odčítame tieto hodnoty normalizovanej impedancie

$$r_n = 3,75 \quad \text{a} \quad x_n = -j1,5$$

Hodnota vstupnej impedancie bude

$$Z_{\text{vst}} = 100(3,75 - j1,5) = (375 - j150) \Omega$$

Činiteľa odrazu určíme pomocou radiálneho otočného pravítka alebo postrannej lineárnej stupnice. Keď tieto nie sú k dispozícii, reflexný činiteľ môžeme vypočítať z pomeru polomeru okrajovej kružnice r_2 a polomeru kružnice prechádzajúcej bodmi A a B.

$$r = \frac{r_1}{r_2} = \frac{30}{48} = 0,62$$

Na obvode diagramu odčítame fázový posun $\varphi = -10,7^\circ$.

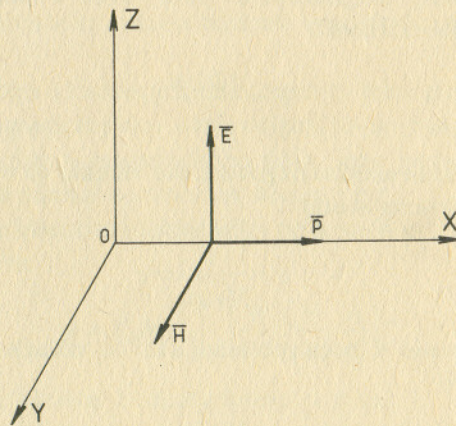
7 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY A ICH ŠÍRENIE

7.1 ZLOŽKY ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNENIA

Elektromagnetické vlnenie vo voľnom priestore, v dostatočnej vzdialenosti od zdroja, obvyčajne považujeme za rovinné. Je to najjednoduchší druh vlnenia a je vždy kolmé na smer šírenia. Takéto vlnenie znázornené na obr. 7.1 sa skladá z elektrickej (E) a magnetickej (H) zložky. Tieto dve zložky sú na seba vždy kolmé a majú v každom bode priestoru rovnakú fázu. Keď zložka elektrického poľa leží v smere osi OZ , zložka magnetickeho poľa v smere osi OY , potom smer osi OX súhlasí so smerom šírenia vlnenia.

V ľubovoľnom okamihu amplitúdy E a H sú viazané vzťahom

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (7.1)$$



Obr. 7.1. Orientácia vektorov intenzity elektrickej a magnetickej zložky poľa