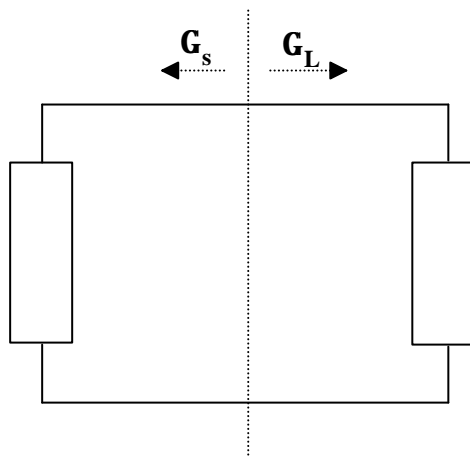


9 Impedanèní pøizpùsobení

Impedanèním pøizpùsobením rozumíme situaci, pøi níž èinitelé odrazu zátìže Γ_L a zdroje (generátoru) Γ_s jsou komplexnì sdruženy. Za této situace nedochází ke vzniku stojatého vlnìní. Formulací "èinitelé odrazu zátìže a zdroje" máme vlastnì na mysli toto: rozdìlíme-li pøizpùsobený obvod myšlenou èarou èi øezem na dvě èásti, pak nezávisle na poloze øezu platí, že koeficienty odrazu Γ_L a Γ_s bran takto vzniklých jsou èíslo navzájem komplexnì sdružená¹⁸. Tato situace je znázornìna na obr. 9.



Obr. 9. K pøizpùsobení.

Obvod impedanènì pøizpùsobený je zároveň v rezonanci. Podmínkou rezonance je totiž to, že imaginární èásti koeficientù odrazu Γ_L a Γ_s jsou stejnì velké, ale opaèného znaménka. Proti tomu podmínka impedanènìho pøizpùsobení

$$\Gamma_L = \Gamma_s^* \quad (48)$$

v sobì navíc zahrnuje i podmínku rovnosti reálných èástí.

Jelikož je impedanènì pøizpùsobený obvod v rezonanci, je možno dokonalého impedanènìho pøizpùsobení dosáhnout jen na jedné nebo nìkolika frekvencích, s vyjímku pøípadu obvodù èistì resistivních.

Zatímco u rezonanèních obvodù se zpravidla snažíme dosáhnout co největší jakosti a tím i selektivity, bývá u obvodù pøizpùsobovacích zpravidla snahou dosažení co nejširšího pásma frekvencí, v nìmž je obvod dostateènì pøizpùsoben. To bývá tím obtížnìjší, èím vìtší je pomìr pøizpùsobovaných impedancí a èím vìtší je jejich jalová složka.

9.1 Dùsledky impedanènìho nepøizpùsobení

Døíve, nežli se vÌnujeme návrhu obvodù, které jsou sto zajistit impedanènì pøizpùsobení, vyložíme, jaké následky by mohlo mít zanedbání pøizpùsobení. Jsou to zejména tyto následky:

¹⁸ To platí nejen pro koeficienty odrazu, ale i pro imitance.

Impedanèní pøizpùsobení

- V nepøizpùsobeném obvodu vzniká stojaté vlnìní. Dochází tak ke zvýšenému namáhání některých èástí obvodu, které jím mohou být někdy znièeny (napø. tranzistory koncových stupùù vf. vysílacù).
- Pøipojením nepøizpùsobeného obvodu mùžeme vnést do ladìných obvodù jalovou složku impedance (tedy jakoby pøidat indukènost èi kapacitu), a tím jej pøeladit.
- Energie, odražená od vstupu obvodu, se po dalším odrazu mùže na tento vstup opìt vrátit s urèitým zpoždìním, a mùže tak znehodnotit pùvodní signál (viz napø. takzvané "duchy" v televizním obraze).
- Dlouhý úsek vedení, které je na obou koncích nepøizpùsobené, má charakter rezonátoru. Rezonuje pøitom na èadi (blízkých) frekvencí, èimž mùže z pøenášeného signálu odfiltrovat některé složky (viz o br. 10.). Takové zkreslení pøenášeného signálu je takøka nanapravitelné.
- Vyzaøovací charakteristika anténního systému mùže být negativnì ovlivnìna nepøizpùsobeným napájecím.
- Nejsou-li obvody, spojené pomocí vedení, k tomuto vedení impedance pøizpùsobeny, mùže být funkce obvodu závislá na délce propojovacího vedení.
- Odrazem energie v místì impedance nepøizpùsobení se snižuje energie dodávaná do zátìže.¹⁹

Jak již bylo øešeno, je impedance pøizpùsobení selektivní. Proto je úplné pøizpùsobení možné jen na koneèném poètu frekvencí. Na ostatních frekvencích pak zpravidla vyžadujeme pøizpùsobení alespoù -20 dB, pøi nìmž se od zátìže odráží ménì než jedno procento výkonu.

Pøíklad C. Ukažte, jak ovlivní pøenos signálu o frekvenci 330 až 336 MHz mezi generátorem a zátìží o impedance 300 Ω úsek nepøizpùsobeného vedení o délce 200 m. Vedení má impedance 50 Ω , je to koaxiální kabel s dielektrikem o relativní permitivitì $\epsilon_r = 2,2$.

Øešení. Uvedený obvod analyzujeme prostøednictvím programu MIDE. Zadání je popsáno souborem v tabulce II.

```
di f 0.0001
```

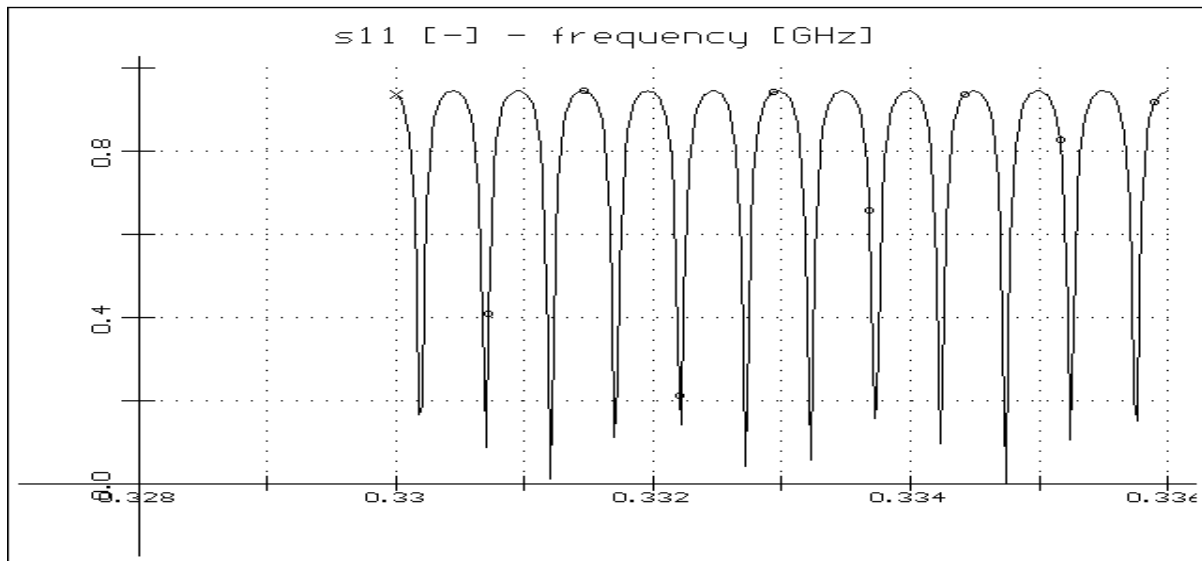
```
freq  
step 330 MHz 336 MHz 0.02 MHz  
end
```

```
blo vedeni 1 2  
i trl 1 2 z=50 ohm Pl=200 m Er=2.2 j  
end
```

Pozor, pro správný výpoèet úlohy je tøeba nastavit zakonèovací impedance 300 Ω pomocí nabídky *Calc*

Tabulka II. Popis øešení pøíkladu C. programem MIDE.

¹⁹ Tento dùsledek impedance nepøizpùsobení je zámìrnì uveden jako poslední. Bývá totiž èasto uvádìn jako dùsledek jediný, aèkoli podle soudu autora tohoto skriptu jsou dříve uvedené dùsledky èasto závažnìjší.



Obr. 10. Vypočtený přenos při špatní přizpůsobeném kabelu. Kopie obrazovky - vypočteno programem MDE.

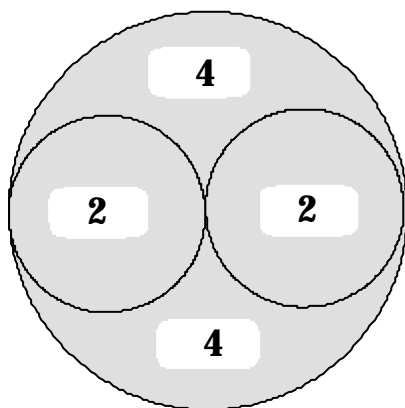
Vypočtená závislost je zobrazena na obr. 10. Přenos se s frekvencí prudce mění. Následkem toho složky signálu o některých frekvencích zmizí ze signálu.

Impedanční přizpůsobení zpravidla realizujeme pomocí *přizpůsobovacích obvodů*. Tyto obvody vhodně transformují impedanci přizpůsobovaného obvodu na impedanci napájecího vedení.

9.2 Impedanční přizpůsobení pomocí obvodů se soustředěnými parametry.

Víme se nejprve přizpůsobování impedancí s pomocí součástí se soustředěnými parametry. K přizpůsobování bývají nejčastěji využívány obvody složené z indukčností a kapacit. V rezistivních obvodech totiž dochází ke ztrátám přeneseného výkonu, zatímco obvody složené z reaktancí slibují (alespoň teoreticky) dosažení přizpůsobení beze ztrát.

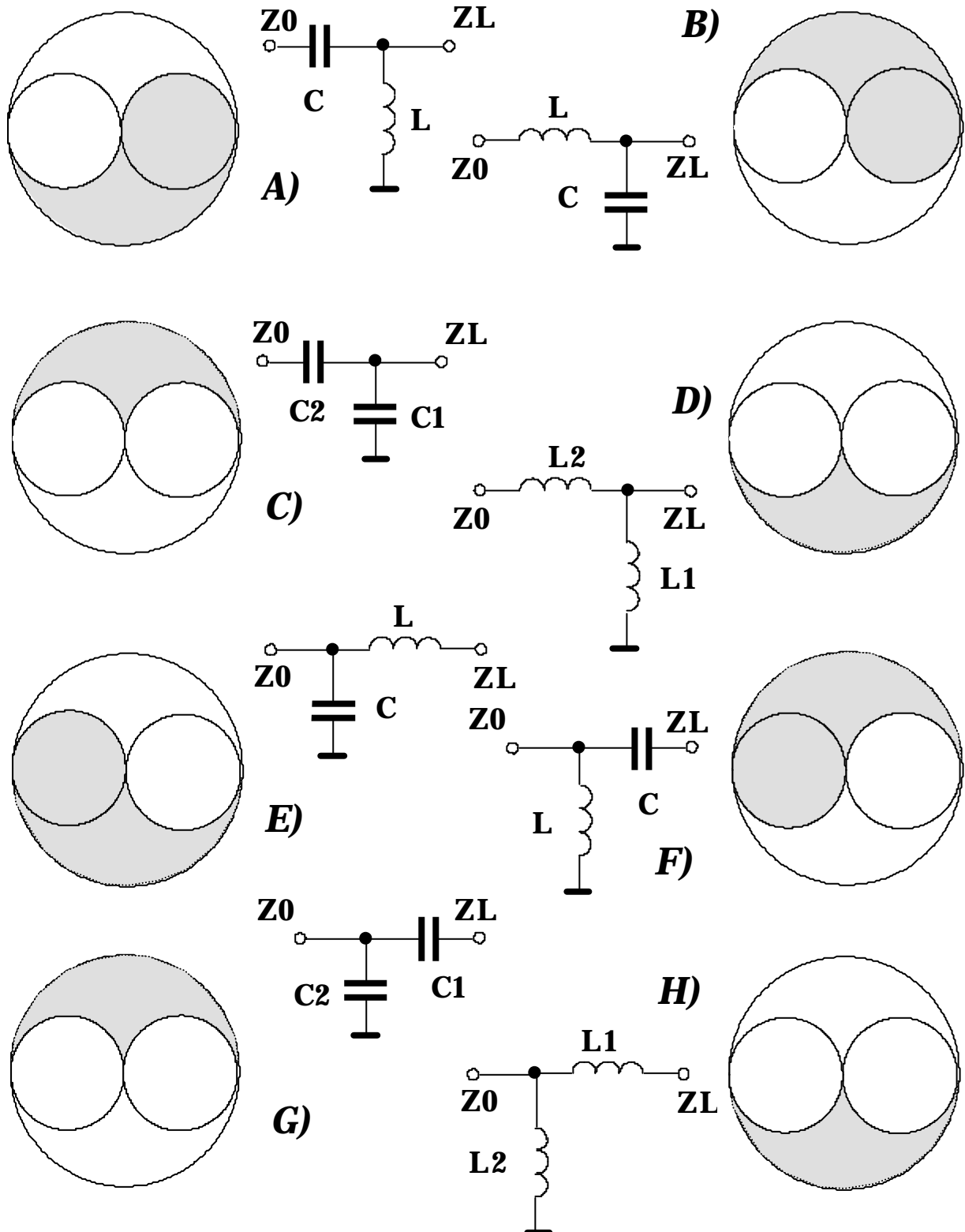
Na obr. 12. je vyobrazeno několik typů jednoduchých přizpůsobovacích obvodů. Ke každému obvodu je připojen schematický náčrt Smithova impedančního diagramu, v němž je šrafováním vyznačena oblast použitelnosti daného obvodu.



Obr. 11. Vyznačení počtu možností při přizpůsobení jednoduchým článkem Γ ve Smithově diagramu.

Jak lze zjistit porovnáním jednotlivých možností, lze každou impedanci přizpůsobit několika způsoby. Ukazuje to i obr. 11. Z tohoto obrázku je zřejmé, že normované impedance, jejichž reálná část je menší nebo rovna 1, a normované admitance, jejichž reálná část je menší nebo rovna 1, lze přizpůsobit dvěma způsoby. Ostatní impedance pak lze přizpůsobit čtyřmi způsoby. Při návrhu přizpůsobovacího obvodu vybíráme z možných řešení to, které

- lze realizovat
- má vhodnou šířku pásma
- přizpůsobovaná impedance neleží na hranici oblastí, pro kterou lze daný obvod použít, ani v její blízkosti. Malá změna



Obr. 12. Přizpůsobení pomocí jednotlivých článků Γ .

Impedanční působení

hodnoty působované impedance by pak totiž mohla vést k nutnosti změnit zapojení.

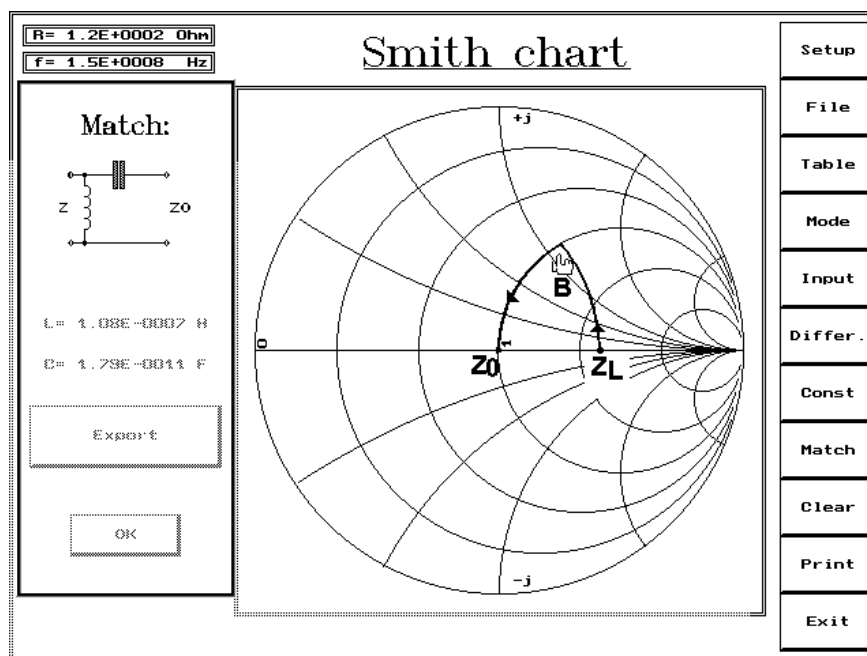
- d) splňuje další funkce - tak např. obvody A, C, F a H poskytují stejnosměrné oddělení zátěže; obvod D stejnosměrně spojuje signálový vodič se zemí z obou stran; obvody A a F mají charakter horní propusti; obvody B a E mají charakter dolní propusti atd.

Vysvětlíme si nyní působení impedance podrobněji na příkladech:

Příklad D. Je dána impedance zátěže $Z_L = 120 \text{ W}$. Působte tuto zátěž k napájecímu kabelu o impedanci 50 W na frekvenci $f = 150 \text{ MHz}$. Určete pásmo frekvencí, ve kterém tímto obvodem dosáhneme odrazu méně než 1% energie (-20 dB). Působovací obvod má zajistit stejnosměrné oddělení zátěže.

Řešení: Impedanci vyneseme do Smithova diagramu, normovaného k impedanci napájecího vedení. Impedance se zobrazí do bodu označeného z_L . Zvolíme typ působení podle obr. 12. A. Paralelním připojením indukčnosti dosáhneme posunu impedance po kružnici konstantní reálné části normované admitance, proti směru pohybu hodinových ručiček. Potřebná je taková hodnota indukčnosti, která způsobí posun impedance právě na jednotkovou kružnici normované reálné části impedance (v obr. 13. je tato poloha označena "B").

Připojením kapacity do série se impedance posouvá po kružnici jednotkové reálné části normované impedance, opět proti směru hodinových ručiček. Vhodná je taková hodnota kapacity, která způsobí posun právě do středu impedančního diagramu, tj. na impedanci napájecího vedení.



Obr. 13. Ilustrace řešení příkladu ve Smithově diagramu. Použití výstup z programu SD, doplněno označení bodů.

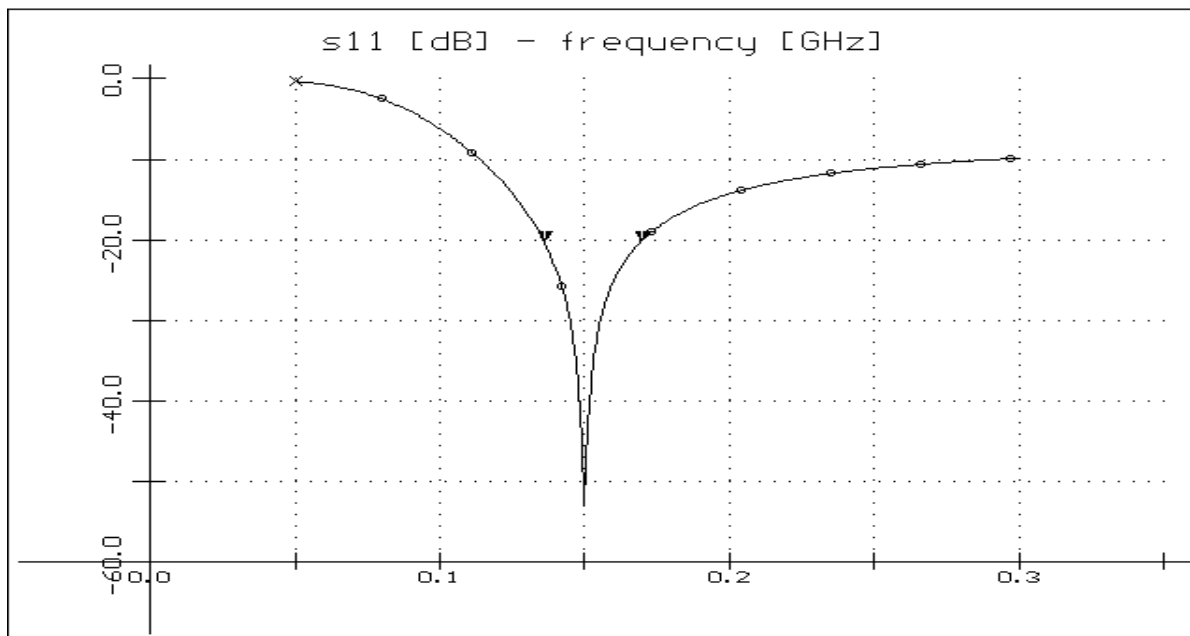
Šířku pásma určíme výpočtem pomocí programu MIDE. Obvod zadáme způsobem uvedeným v tabulce III.

Impedanční působení

| | |
|--|--|
| <pre> freq step 50 MHz 300 MHz 1 MHz end blo match 1 99 itee 1 2 3 ind 2 4 L=1.08E-0007 H short 4 cap 3 99 C=1.79E-0011 F end blo zatez 1 load 1 r=120 ohm end blo celek 1 match 2 1 zatez 2 end </pre> | <p>vysvětlivky:</p> <p>zadání frekvence</p> <p>působivý obvod</p> <p>zátěž 120 Ω</p> <p>výsledný obvod vznikne spojením působivého obvodu a zátěže</p> |
|--|--|

Tabulka III. Zápis určení šířky pásma v MDE.

Z vypočtené závislosti amplitudy koeficientu odrazu na frekvenci (obr. 14.) určíme šířku pásma 136 až 170 MHz.



Obr. 14. Vypočtená závislost koeficientu odrazu výsledného obvodu na frekvenci.

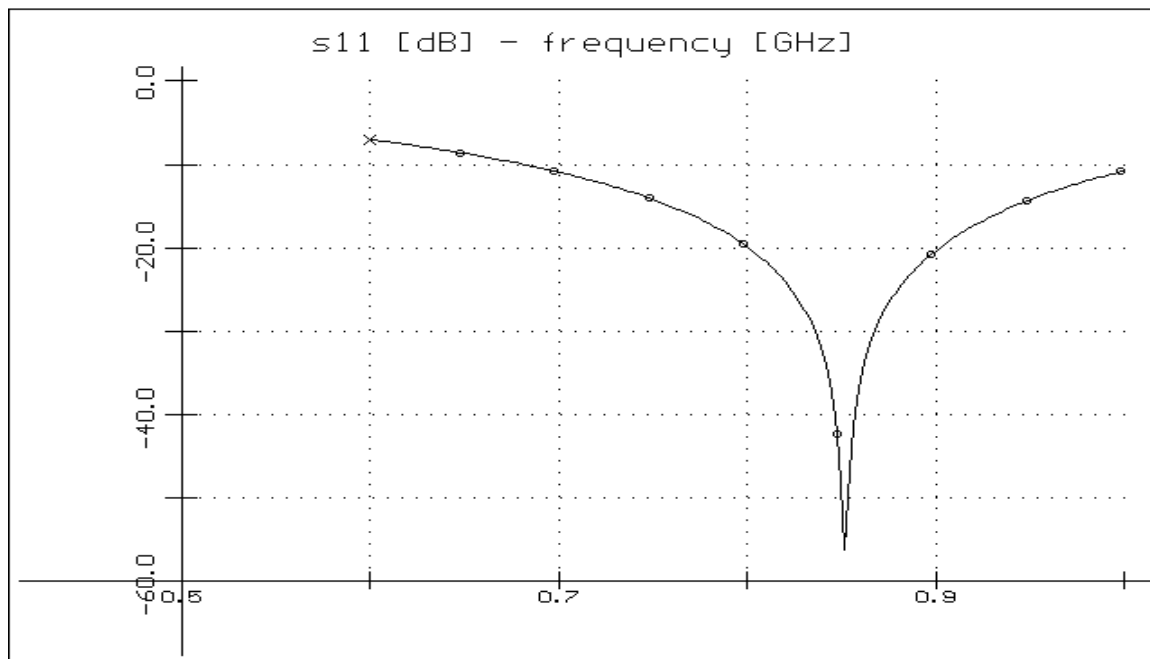
Příklad E. Působte zátěž tvořenou sériovou kombinací rezistoru $R = 30 \text{ W}$, kapacitoru $C = 5 \text{ pF}$ a induktoru $L = 12 \text{ nH}$ k napájecímu kabelu o impedanci 50 W na frekvenci 850 MHz .

Impedanční přizpůsobení

Řešení: Obvod přizpůsobíme tak, že k němu nejprve do série připojíme kondenzátor o hodnotě 79 pF, a k této kombinaci paralelní kondenzátor o hodnotě 3 pF. Šířku pásma určíme opět pomocí programu MIDE. Zápis úlohy obsahuje tabulka IV., vypočtenou závislost koeficientu odrazu na frekvenci pak obr. 15.

| | |
|---|--|
| <pre>freq step 600 MHz 1 GHz 1 MHz end</pre> | Vysvětlivky: zadání frekvence |
| <pre>blo zatez 1 load 1 r=30 ohm l=12 nH C=5 pF end</pre> | zátěž |
| <pre>blo match 1 99 cap 1 2 C=7.92E-0011 F itee 2 3 99 cap 3 4 C=3.04E-0012 F short 4 end</pre> | přizpůsobovací obvod |
| <pre>blo celek 1 zatez 2 match 2 1 end</pre> | celek - kaskádní spojení přizpůsobovacího obvodu a zátěže |

Tabulka IV. Vstupní soubor pro program MIDE.



Obr. 15. Výsledná závislost koeficientu odrazu na frekvenci. Vypočteno programem MIDE - kopie obrazovky.

Úloha A: Proveďte přizpůsobení impedance z předchozího příkladu pomocí článků G , a to pro všechny možnosti dle obr. 12. Porovnejte šířku pásma jednotlivých řešení.

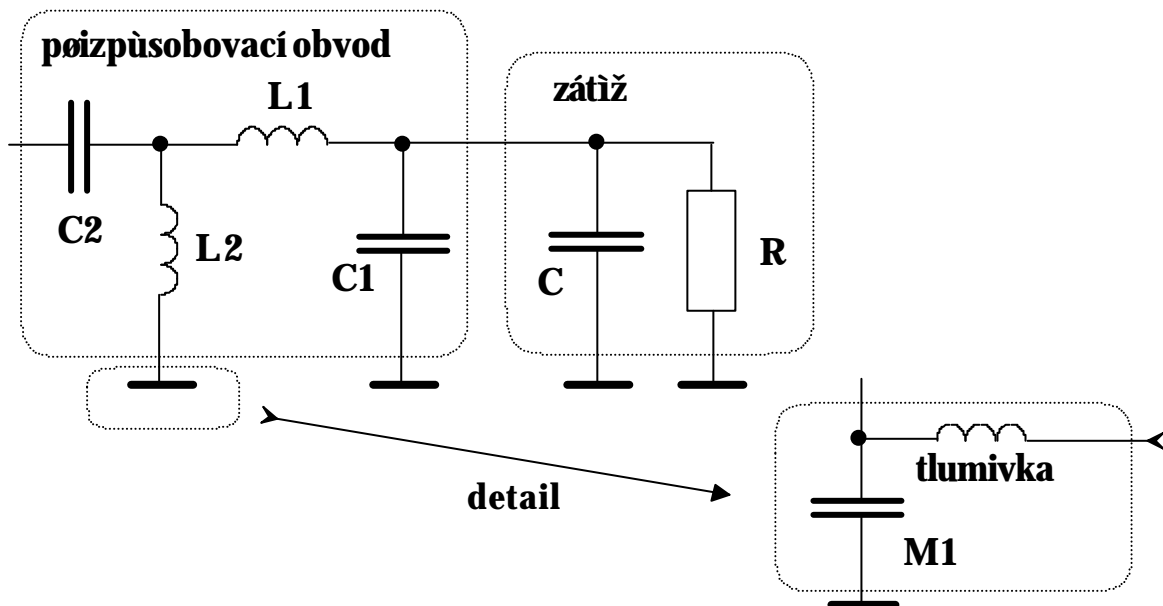
9.3 Širokopásmové přizpůsobení

Nepostačuje-li šířka pásma jednoduchého přizpůsobovacího obvodu, používají se přizpůsobovací obvody vyššího řádu.

Praktický návrh je omezen tím, že obvody vyšších řádů bývají ztrátové do té míry, že se sice žádná energie zpět ke zdroji neodrazí (což vítáme), ale stejně tak jen velmi málo energie projde přizpůsobovacím obvodem do zátěže (což již není tak vítané²⁰). Navíc vykazují obvody vyšších řádů větší citlivost na hodnoty jejich součástí. To v praxi obvykle omezuje nejvyšší použitelný řád obvodu na 5 až 6.

Návrh širokopásmového přizpůsobovacího obvodu ukážeme na následujícím příkladu:

Příklad F. Zadání: Přizpůsobte zátěž, tvořenou paralelní kombinací $R = 100 \text{ } \Omega$ a $C = 5 \text{ pF}$ k napájecímu kabelu o impedanci $50 \text{ } \Omega$ v pásmu 50 až 148 MHz. Přizpůsobovací obvod musí umožnit stejnosměrné oddělení zátěže od kabelu a přivedení stejnosměrného předpětí (na zátěž).



Obr. 16. Příklad širokopásmového přizpůsobení. Detail vpravo ukazuje způsob přivedení stejnosměrného předpětí.

²⁰ Ovšem jak kým. Právě značné ztráty přizpůsobovacích obvodů antén jsou důvodem, pročeť firmy nabízející pokrytí území vysíláním trvají na měření výkonu u generátoru, takže ztráty v přizpůsobovacích obvodech platí odbíratel. Pak ovšem může být paradoxní zájmem konstruktéra

Impedanční přizpůsobení

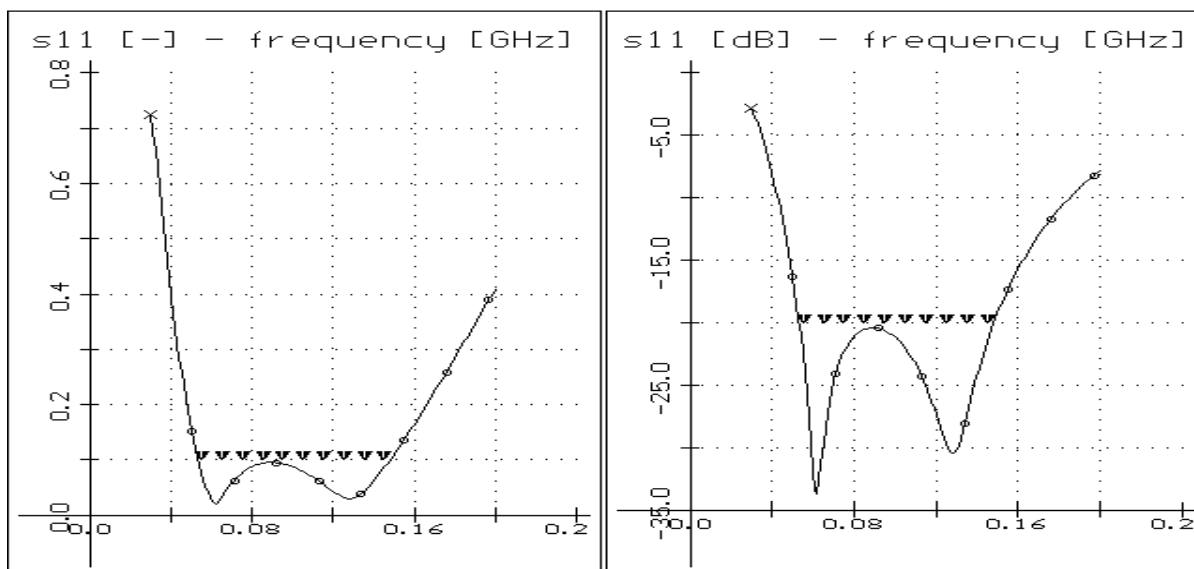
Řešení: Použijeme obvod 4. řádu, vzniklý spojením obvodů podle obr. 11. B a A. Přitom dolní propust připojíme k zátěži, zatímco horní propust spojíme s kabelem. Výsledný obvod je na obr. 16.

Obvod navrhne ve dvou krocích. V prvním kroku navrhne exaktní přizpůsobení na některé frekvenci uvnitř pásma; ve druhém kroku pak s pomocí optimalizátoru upravíme hodnoty součástí tak, aby obvod splnil požadavky v celém pásmu.

Při návrhu exaktního přizpůsobení postupujeme tak, že první článěk G zajistí transformaci na hodnotu $Z_1 = \sqrt{R_L Z_0}$ a druhý článěk transformuje tuto hodnotu na impedanci napájecího kabelu. Hodnoty prvků přizpůsobovacího obvodu jsou vyneseny v tabulce V. Vypočítaný průběh koeficientu odrazu v závislosti na frekvenci je zobrazen na obr. 17. Vstupní soubor pro optimalizaci pomocí programu MIDE je uveden v tabulce VI.

| prvek | C1 | C2 | L1 | L2 |
|-------------------------|---------|---------|---------|--------|
| přizpůsobení 100 MHz | 5 pF | 49 pF | 72,4 nH | 175 nH |
| přizpůsobení v pásmu | 5,48 pF | 64,6 pF | 69,1 nH | 246 nH |

Tabulka V. Hodnoty součástí.



Obr. 17. Koeficient odrazu v závislosti na frekvenci. Vypočteno a vykresleno programem MIDE.

Další informace k této problematice lze nalézt například v literatuře [1], [4].

ztráty zvětšovat.

Impedanční přizpůsobení

| | |
|--|--|
| <pre> opt step 50 MHz 148 MHz 2 MHz DS11 < -20 end freq step 30 MHz 200 MHz 1 MHz end * PROMENNE var C1 5 pF var L1 72.4 nH var C2 49 pF var L2 175 nH * PRIZPUSOBOVACI OBVOD blo match 1 99 itee 1 2 3 cap 2 4 C=C1 </pre> | <pre> ind 3 5 L=L1 short 4 itee 5 6 7 ind 6 8 L=L2 cap 7 99 C=C2 short 8 end blo zatez 1 itee 1 2 3 load 2 r=100 ohm load 3 c=5 pF end blo celek 1 match 2 1 zatez 2 end </pre> |
|--|--|

Tabulka VI. Soubor pro stanovení hodnot prvků přizpůsobovacího obvodu optimalizací. Pro úsporu místa rozděleno do dvou sloupců.

9.4 Přizpůsobování impedancí pomocí obvodů s rozprostřenými parametry

S rostoucí frekvencí se realizace přizpůsobovacích obvodů se soustředěnými parametry stává obtížnou až nemožnou. Na vyšších frekvencích totiž takové obvody vyžadují indukčnosti a kapacity malých hodnot. Ty je jednak obtížné realizovat, jednak mívají malou jakost. Realizace kapacit pod jeden pikofarad a indukčností pod nanohenry je efektivní pouze v monolitických integrovaných obvodech.

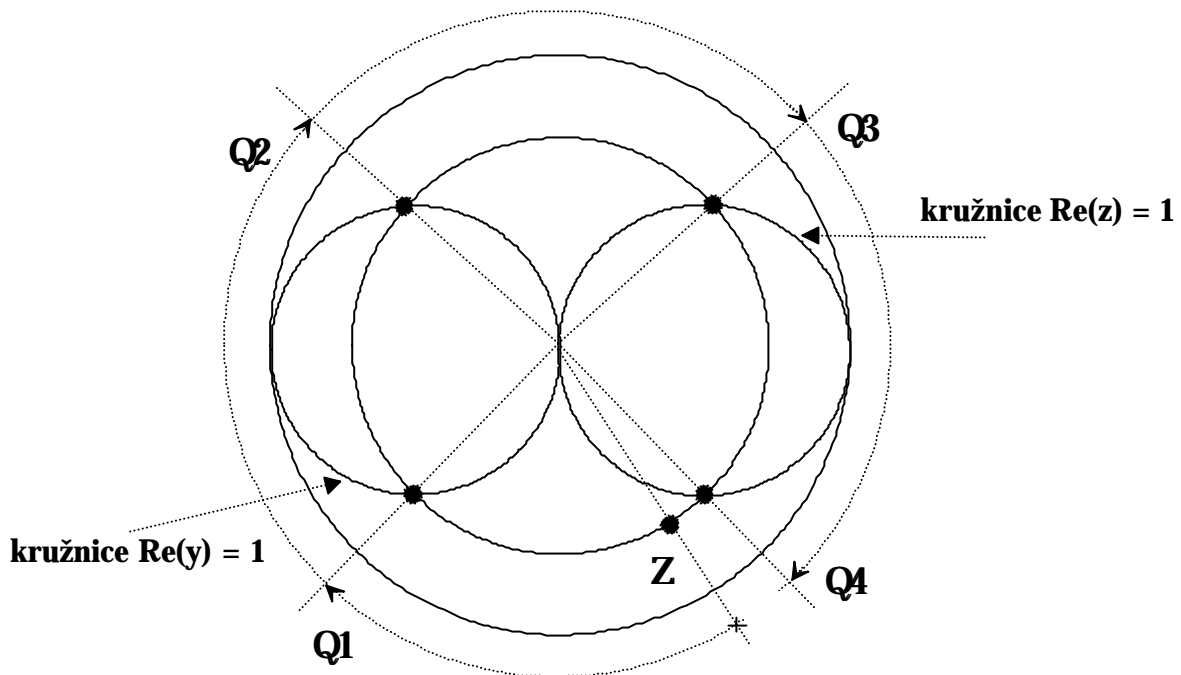
Alternativním řešením jsou na vyšších frekvencích přizpůsobovací obvody s rozprostřenými parametry, zpravidla tvořené úseky vedení vhodné délky a impedance. Na tomto místě bude vysvětlen jeden ze způsobů impedančního přizpůsobování, který využívá úseku vedení a pahýlu²¹. Takové přizpůsobení se provádí ve dvou krocích:

- a) K přizpůsobované impedanci se připojí úsek vedení. Impedance na vstupu tohoto úseku vedení leží ve Smithově diagramu²² na kružnici konstantního PSV, která přísluší přizpůsobované zátěži. Tento úsek transformuje impedanci tak, že při jeho vhodné délce je na vstupu tohoto vedení reálná část normované impedance nebo normované admitance rovna 1.
- b) Jalovou složku této imitance kompenzujeme sériovým připojením reaktance (pokud $\text{Re}(z) = 1$) nebo paralelním připojením susceptance (pokud $\text{Re}(y) = 1$) tak, aby výsledná normovaná impedance byla rovna 1, což odpovídá stavu přizpůsobení. Reaktanci či

²¹ Takový obvod bývá někdy v anglosaské literatuře označován *G-shape matching circuit* - přizpůsobovací obvod ve tvaru Γ .

²² rozumí se normovaném k impedanci vedení

Impedanční přizpůsobení



Obr. . Ilustrace při způsobování.

susceptanci realizujeme pomocí úseku vedení zakoněného jednotkovým odrazem (zpravidla otevřeným koncem nebo zkratem).

To je znázorněno na obr. 18.

To, kterou z délek Θ_1 až Θ_4 vybereme, bývá ovlivněno:

- Tím, zda je v použitém typu vedení snazší realizovat paralelní či sériové připojení pahýlu.
- Výslednou šířkou pásma přizpůsobení.
- Tím, zda je snazší realizovat zkrat nebo otevřený konec.

Příklad G. Zadání: Přizpůsobte normovanou impedanci $z = 1 + 2j$ na frekvenci $f = 2$ GHz. Přizpůsobení proveďte v koaxiální struktuře. Jako dielektrikum uvažujte vzduch. Přizpůsobovací obvod má zajišťovat stejnosměrné propojení.

Řešení: V koaxiální struktuře lze realizovat sériové připojení pahýlu např. tak, že je pahýl vytvořen uvnitř vnitřního vodiče. To je znázorněno na obr. 19., spolu se schématickým nákresem obvodu. Pahýl na obou koncích galvanicky propojíme se středním vodičem, takže bude zajištěn přenos stejnosměrného proudu. Pokud uvažujeme impedanci obou koaxiálních vedení stejnou, budou délky L_1 a L_2 po řadě rovny 75 mm a 48,6 mm.

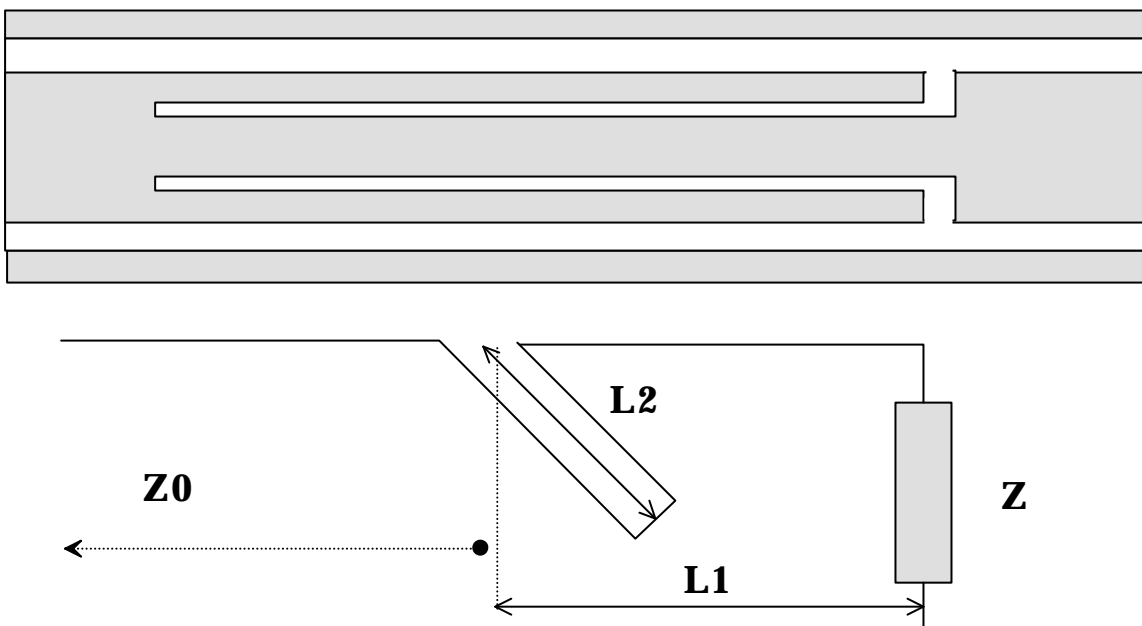
Výsledná závislost vstupního koeficientu odrazu na frekvenci je vynesena na obr. 20.

Impedanční přizpůsobení

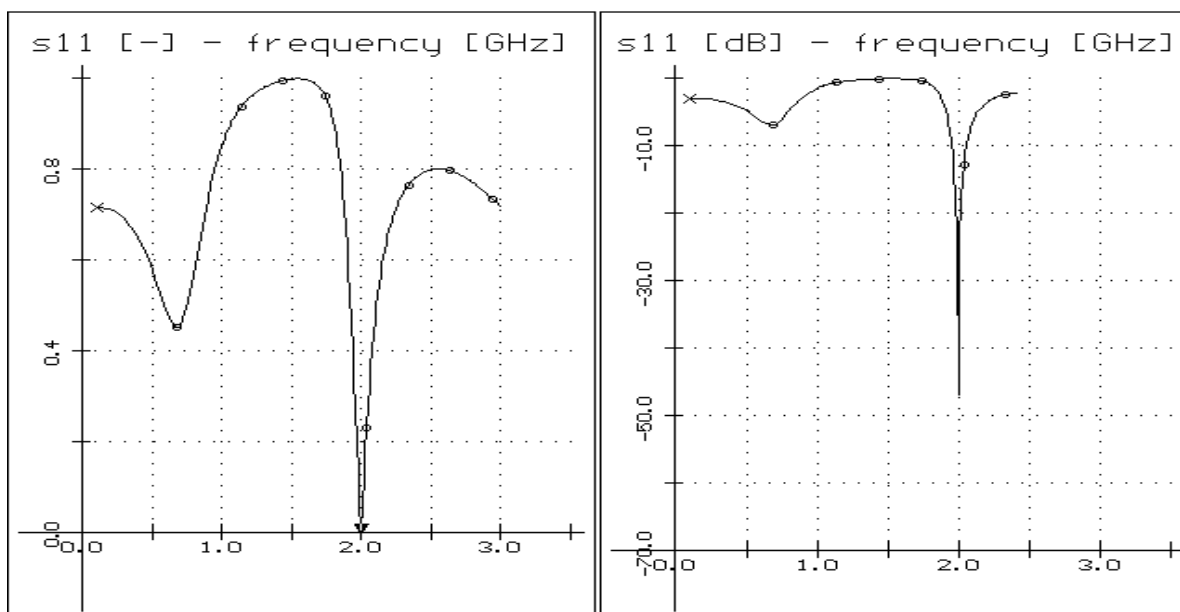
Úloha B.: Vysvětlete s pomocí Smithova impedančního diagramu, proč vzniká minimum přenosu na frekvenci 680 MHz na obr. 20.

Úloha C.: Přizpůsobte impedanci z příkladu G. na frekvenci 2 GHz paralelním připojením pahýlu na konci otevřeného.

Úloha D.: Přizpůsobte impedanci z příkladu G. na frekvenci 2 GHz paralelním připojením pahýlu na konci zkratovaného.



Obr. . Přizpůsobovací obvod k příkladu G. Dole schématický obvod, nahoře provedení sériového pahýlu v koaxiálním vedení.



Obr. 18. Vypoètená závislost koeficientu odrazu na frekvenci.