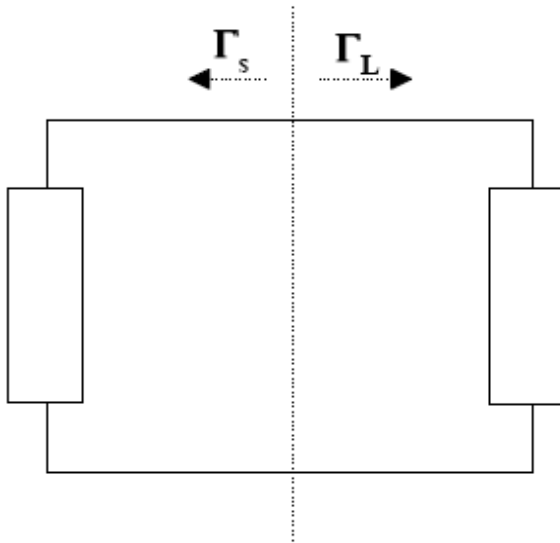


9 Impedanční přizpůsobení

Impedančním přizpůsobením rozumíme situaci, při níž činitelé odrazu zátěže Γ_L a zdroje (generátoru) Γ_s jsou komplexně sdruženy. Za této situace nedochází ke vzniku stojatého vlnění. Formulací "činitelé odrazu zátěže a zdroje" máme vlastně na mysli toto: rozdělíme-li přizpůsobený obvod myšlenou čarou či řezem na dvě části, pak nezávisle na poloze řezu platí, že koeficienty odrazu Γ_L a Γ_s bran takto vzniklých jsou čísla navzájem komplexně sdružená¹⁸. Tato situace je znázorněna na obr. 9.



Obr. 9. K přizpůsobení

Obvod impedančně přizpůsobený je zároveň v rezonanci. Podmínkou rezonance je totiž to, že imaginární části koeficientů odrazu Γ_L a Γ_s jsou stejně velké, ale opačného znaménka. Proti tomu podmínka impedančního přizpůsobení

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

v sobě navíc zahrnuje i podmínku rovnosti reálných částí.

Jelikož je impedančně přizpůsobený obvod v rezonanci, je možno dokonalého impedančního přizpůsobení dosáhnout jen na jedné nebo několika frekvencích, s výjimkou případu obvodů čistě rezistivních.

Zatímco u rezonančních obvodů se zpravidla snažíme dosáhnout co největší jakosti a tím i selektivity, bývá u obvodů přizpůsobovacích zpravidla snahou dosažení co nejširšího pásma frekvencí, v němž je obvod dostatečně přizpůsoben. To bývá tím obtížnější, čím větší je poměr přizpůsobovaných impedancí a čím větší je jejich jalová složka.

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

9.1 Důsledky impedančního nepřizpůsobení

Dříve, nežli se věnujeme návrhu obvodů, které jsou sto zajistit impedanční přizpůsobení, vyložme, jaké následky by mohlo mít zanedbání přizpůsobení. Jsou to zejména tyto následky:

- a) V nepřizpůsobeném obvodu vzniká stojaté vlnění. Dochází tak ke zvýšenému namáhání některých částí obvodu, které jím mohou být někdy zničeny (např. tranzistory koncových stupňů vf. vysílačů).
- b) Připojením nepřizpůsobeného obvodu můžeme vnést do laděných obvodů jalovou složku impedance (tedy jakoby přidat indukčnost či kapacitu), a tím jej přeladit.
- c) Energie, odražená od vstupu obvodu, se po dalším odrazu může na tento vstup opět vrátit s určitým zpožděním, a může tak znehodnotit původní signál (viz např. takzvaní "duchové" v televizním obraze).
- d) Dlouhý úsek vedení, které je na obou koncích nepřizpůsobené, má charakter rezonátoru. Rezonuje přitom na řadě (blízkých) frekvencí, čímž může z přenášeného signálu odfiltrout některé složky (viz obr. 10). Takové zkreslení přenášeného signálu je takřka nenapravitelné.
- e) Vyzařovací charakteristika anténního systému může být negativně ovlivněna nepřizpůsobeným napáječem.
- f) Nejsou-li obvody, spojené pomocí vedení, k tomuto vedení impedančně přizpůsobeny, může být funkce obvodu závislá na délce propojovacího vedení.
- g) Odrazem energie v místě impedančního nepřizpůsobení se snižuje energie dodávaná do zátěže.¹⁹

Jak již bylo řečeno, je impedanční přizpůsobení selektivní. Proto je úplné přizpůsobení možné jen na konečném počtu frekvencí. Na ostatních frekvencích pak zpravidla vyžadujeme přizpůsobení alespoň -20 dB, při němž se od zátěže odráží méně než jedno procento výkonu.

Příklad C. Ukažte, jak ovlivní přenos signálu o frekvenci 330 až 336 MHz mezi generátorem a zátěží o impedanci 300Ω úsek nepřizpůsobeného vedení o délce 200 m. Vedení má impedanci 50Ω , je to koaxiální kabel s dielektrikem o relativní permitivitě $\epsilon_r = 2,2$.

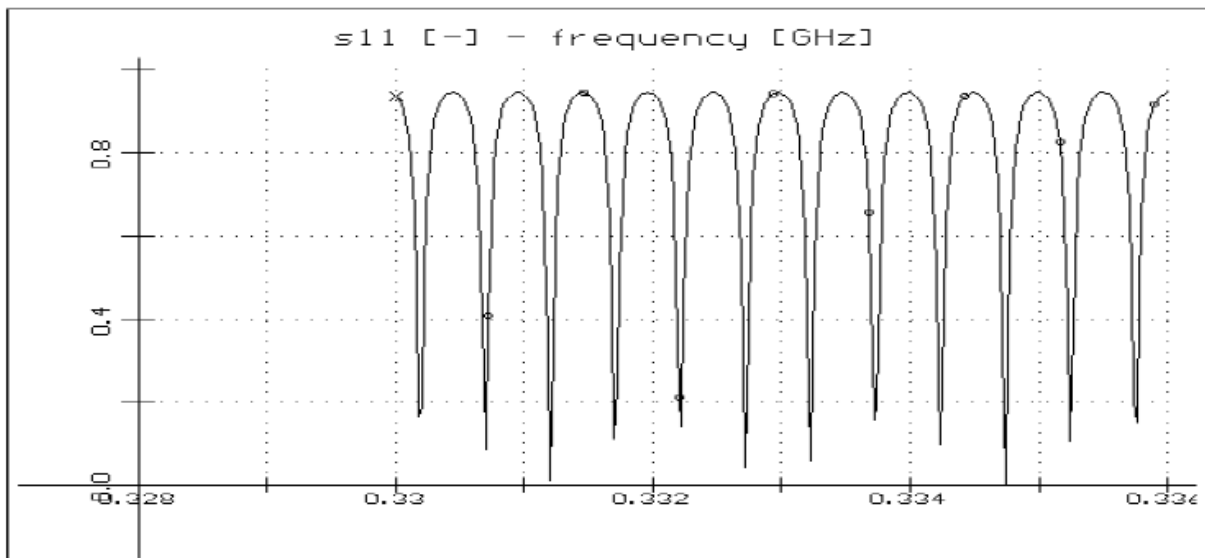
¹⁹ Tento důsledek impedančního nepřizpůsobení je záměrně uveden jako poslední. Bývá totiž často uváděn jako důsledek jediný, ačkoli podle soudu autora tohoto skriptu jsou dříve uvedené důsledky často závažnější.

Impedanční přizpůsobení

Řešení. Uvedený obvod analyzujeme prostřednictvím programu MIDE. Zadání je popsáno souborem v tabulce II.

<pre>dif 0.0001 freq step 330 MHz 336 MHz 0.02 MHz end blo vedeni 1 2 itr1 1 2 z=50 ohm P1=200 m Er=2.2 j end</pre>	Pozor, pro správný výpočet úlohy je třeba nastavit zakončovací impedance 300Ω pomocí nabídky Calc
---	--

Tabulka II. Popis řešení příkladu C. programem MIDE.



. Obr. 10. Vypočtený přenos při špatně přizpůsobeném kabelu.
Kopie obrazovky - vypočteno programem MIDE

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.

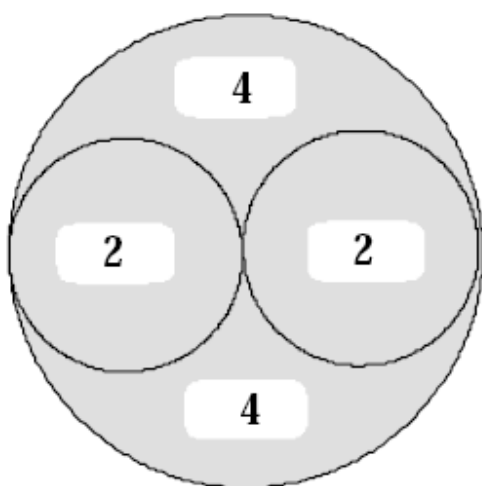
9.2 Impedanční přizpůsobení pomocí obvodů se soustředěnými parametry.

Věnujme se nejprve přizpůsobování impedancí s pomocí součástek se soustředěnými parametry.

K přizpůsobování bývají nejčastěji využívány obvody složené z indukčností a kapacit.

V rezistivních obvodech totiž dochází ke ztrátám přenášeného 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 šrafovaním vyznačena oblast použitelnosti daného obvodu.



Obr. 11. Vyznačení počtu možností 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

a) lze realizovat

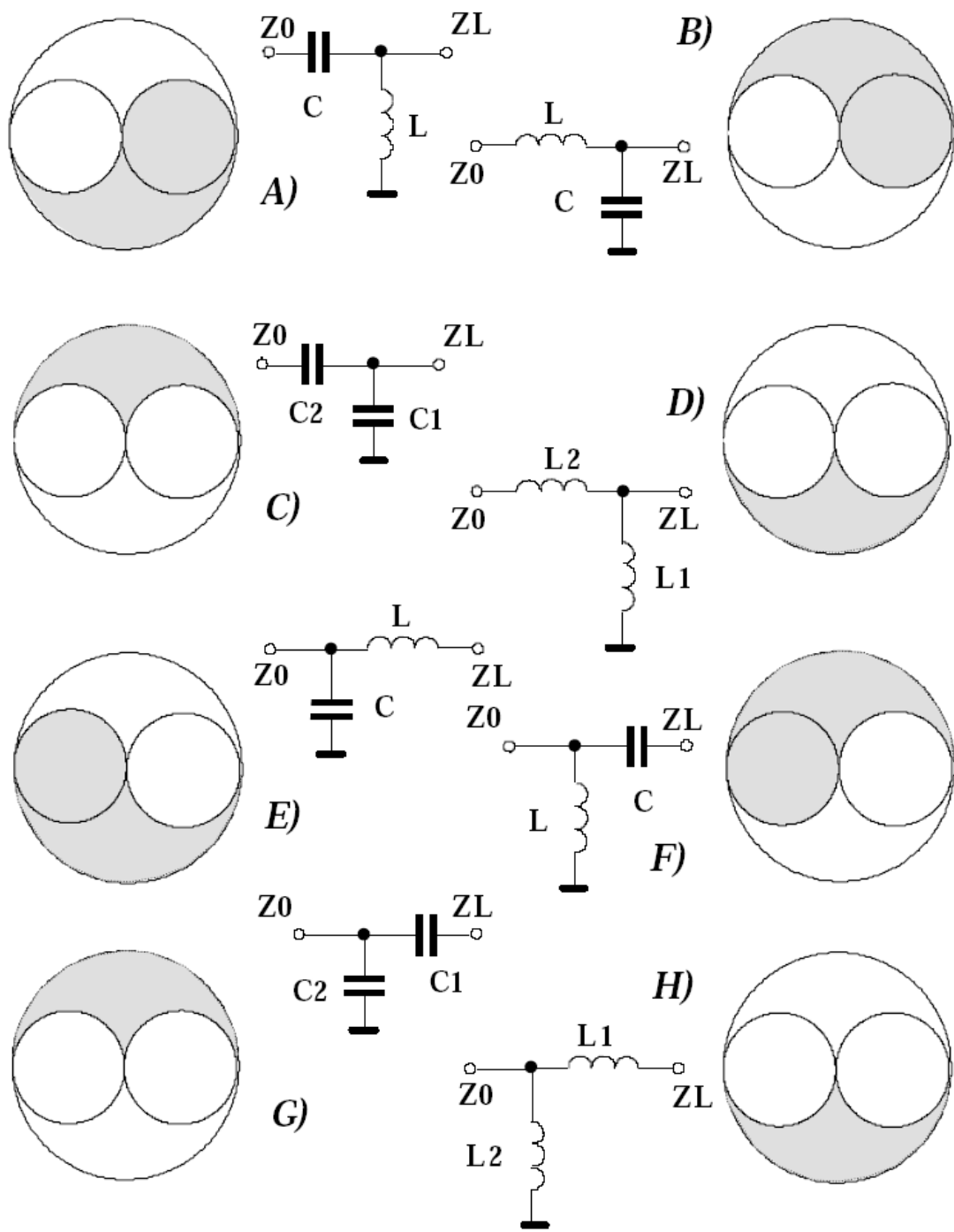
b) má vhodnou šířku pásma

c) přizpůsobovaná impedance neleží na hranici oblasti, pro kterou lze daný obvod použít, ani v její blízkosti. Malá změna hodnoty přizpůsobované 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.

Impedanční přizpůsobení



Obr. 12. Přizpůsobení pomocí jednotlivých článků Γ .

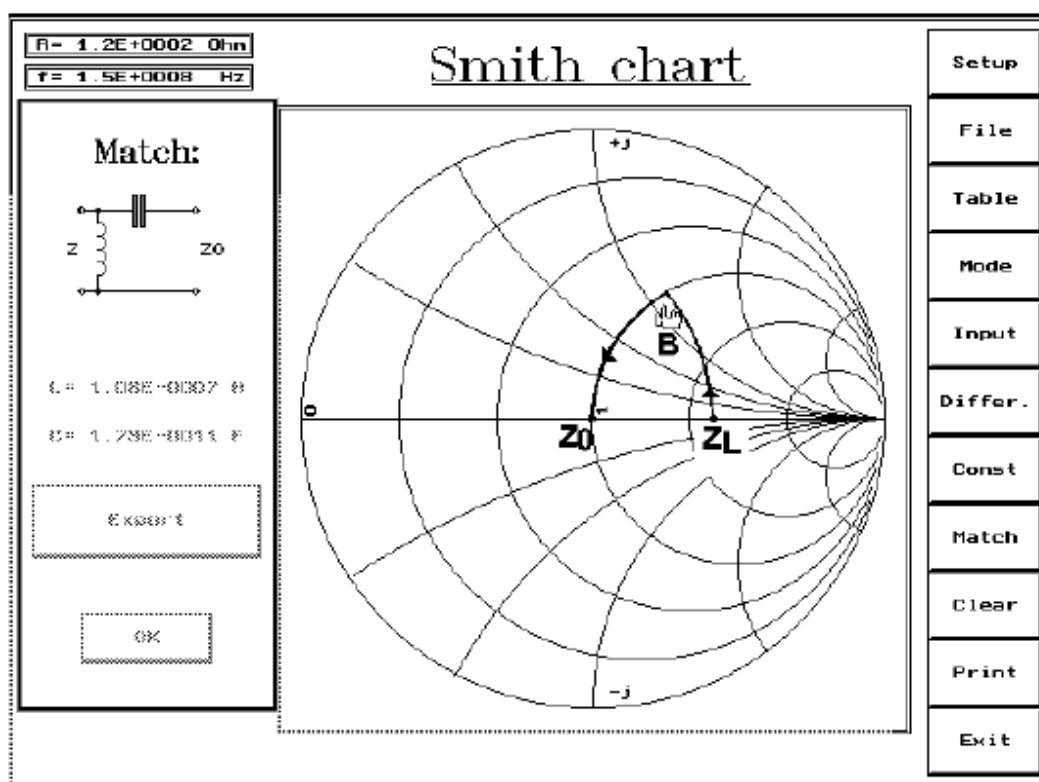
Impedanční přizpůsobení

Vysvětleme si nyní přizpůsobení impedance podrobněji na příkladech:

Příklad D. Je dána impedance zátěže $Z_L = 120 \Omega$. Přizpůsobte tuto zátěž k napájecímu kabelu o impedanci 50Ω na frekvenci $f = 150 \text{ MHz}$. Určete pásmo frekvencí, ve kterém tímto obvodem dosáhneme odrazu méně než 1% energie (-20 dB). Přizpůsobovací 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 přizpůsobení podle obr. 12. A. Paralelním připojením indukčnosti dosáhneme posunu impedance po kružnici konstantní reálné části normované admittance, 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. Použit výstup z programu SD, doplněno označení bodů.

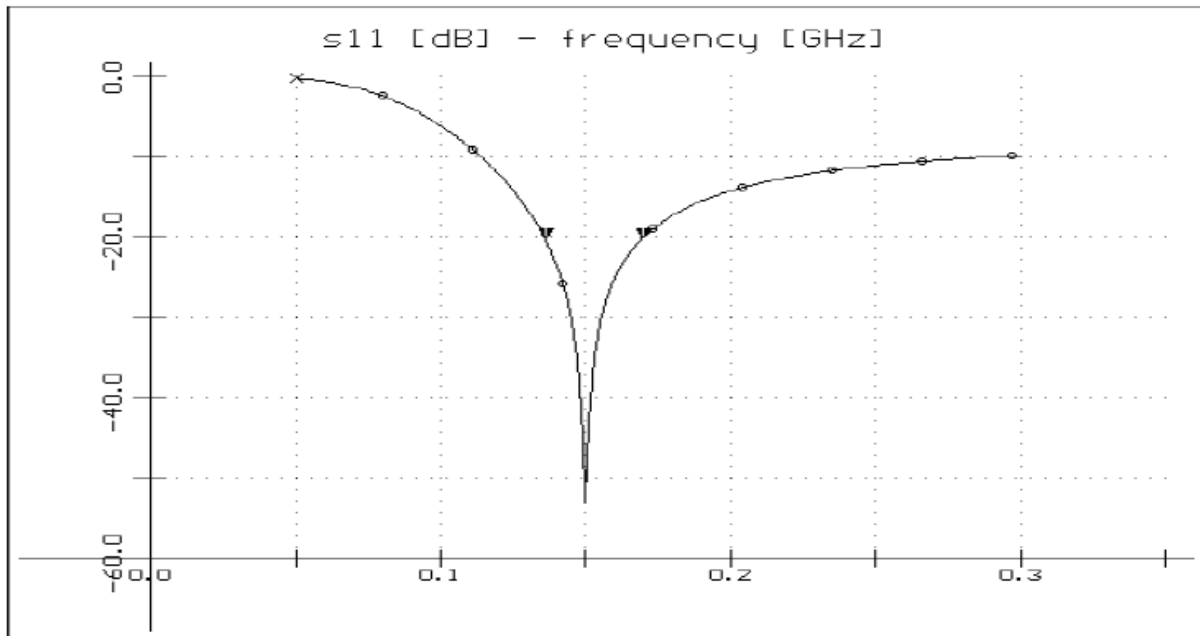
Šířku pásma určíme výpočtem pomocí programu MIDE. Obvod zadáme způsobem uvedeným v tabulce III.

Impedanční přizpůsobení

<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>přizpůsobovací obvod</p> <p>zátěž 120Ω</p> <p>výsledný obvod vznikne spojením přizpůsobovacího obvodu a zátěže</p>
--	--

Tabulka III. Zápis určení šířky pásma v MIDE.

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.

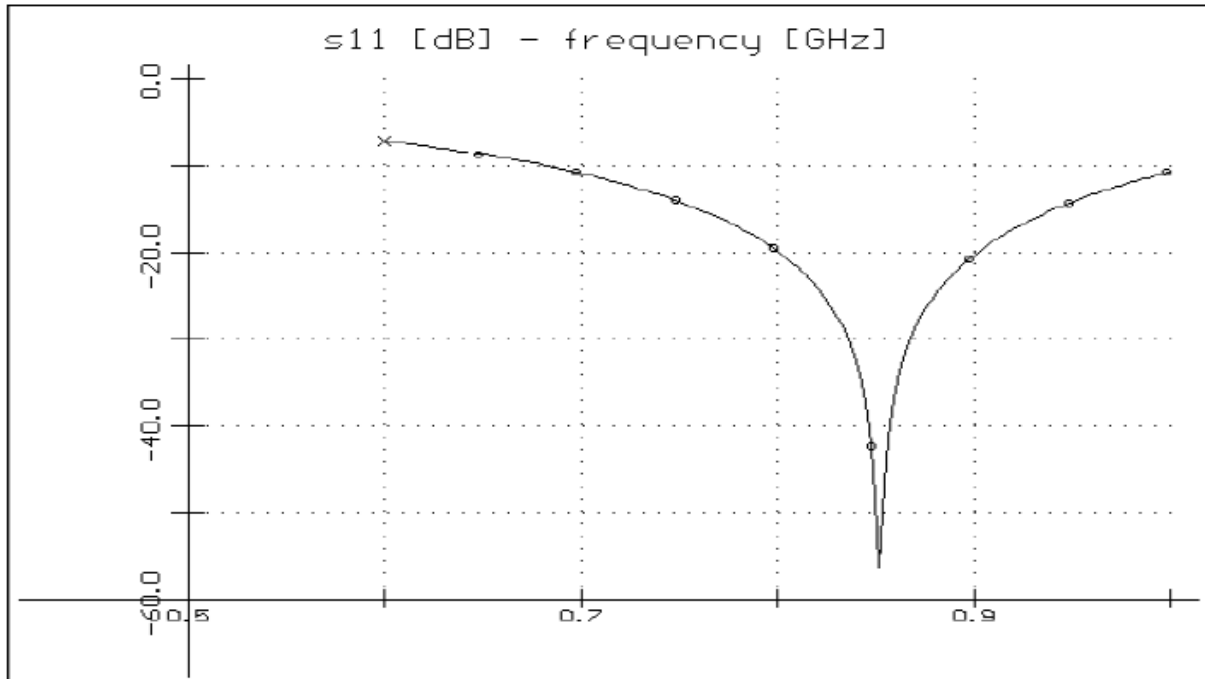
Příklad E. Přizpůsobte zátěž tvořenou sériovou kombinací rezistoru $R = 30 \Omega$, kapacitoru $C = 5 \text{ pF}$ a induktoru $L = 12 \text{ nH}$ k napájecímu kabelu o impedanci 50Ω na frekvenci 850 MHz.

Impedanční přizpůsobení

Řešení: Obvod přizpůsobíme tak, že k němu nejprve do série připojíme kondenzátor o hodnotě 79 pF, a k této kombinaci paralelně 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: Provedte přizpůsobení impedance z předchozího příkladu pomocí článků Γ , a to pro všechny možnosti dle obr. 12. Porovnejte šířku pásma jednotlivých řešení.

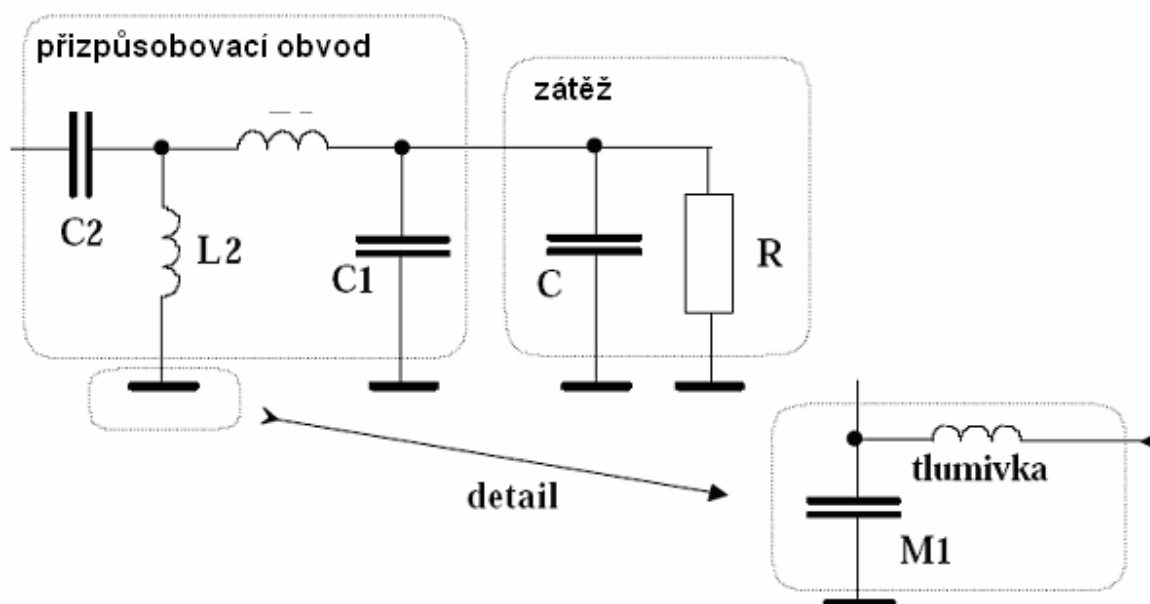
9.3 Širokopásmové přizpůsobení

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 součástek. 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 $R = 100 \Omega$ a $C = 5 \text{ pF}$ k napájecímu kabelu o impedanci 50Ω v pásmu 50 až 148 MHz. Přizpůsobovací obvod musí umožnit stejnosměrné oddělení zátěže od kabelu a přivedení stejnosměrného předpětí (na zátěž).



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

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

Impedanční přizpůsobení

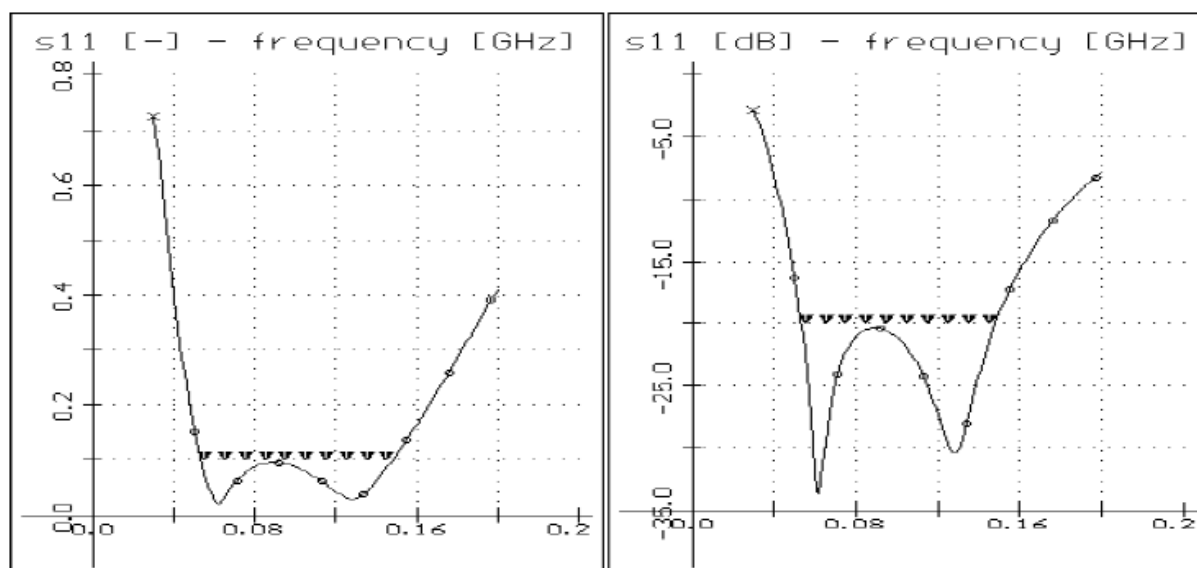
Řešení: Použijeme obvod 4. řádu, vzniklý spojením obvodů podle obr. 11. B a A. Přitom dolní propust připojíme k zátěži, zatímco horní propust spojíme s kabelem.

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 součástek tak, aby obvod splnil požadavky v celém pásmu. Při návrhu exaktního přizpůsobení postupujeme tak, že první článek Γ zajistí transformaci na hodnotu $Z_1 \square RLZ_0$ a druhý článek 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 100MHz	5 pF	49 pF	72.4 nH	175 nH
přizpůsobení v pásmu	5.48 pF	64.6 pF	68.1 nH	246 nH

Tabulka V. Hodnoty součástek.



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

Další informace k této problematice čtenář nalezne například v literatuře [1], [4].

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=11 short 4 itee 5 6 7 ind 6 8 L=12 cap 7 99 C=c2 short 8 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:

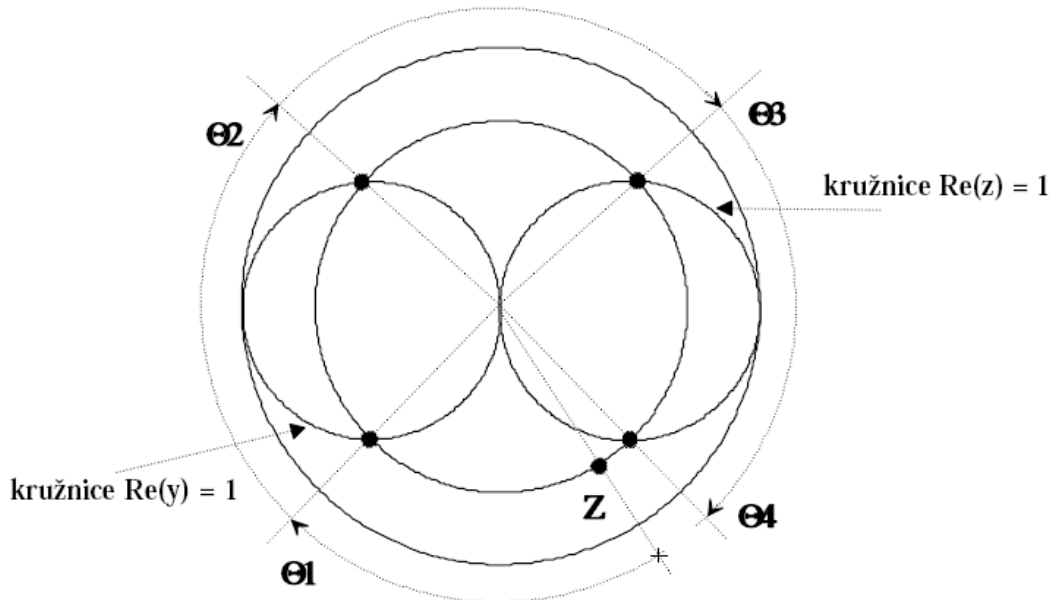
- a) K přizpůsobované impedanci se připojí úsek vedení. Impedance na vstupu tohoto úseku vedení leží ve Smithově diagramu²² na kružnici konstantního PSV, která přísluší přizpůsobované zátěži. Tento úsek transformuje impedanci tak, že při jeho vhodné délce je na vstupu tohoto vedení reálná část normované 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 *Γ -shape matching circuit* - přizpůsobovací obvod ve tvaru Γ .

²² rozumí se normovaném k impedanci vedení

Impedanční přizpůsobení

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



Obr.18 Ilustrace přizpůsobování.

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 proved'te 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.

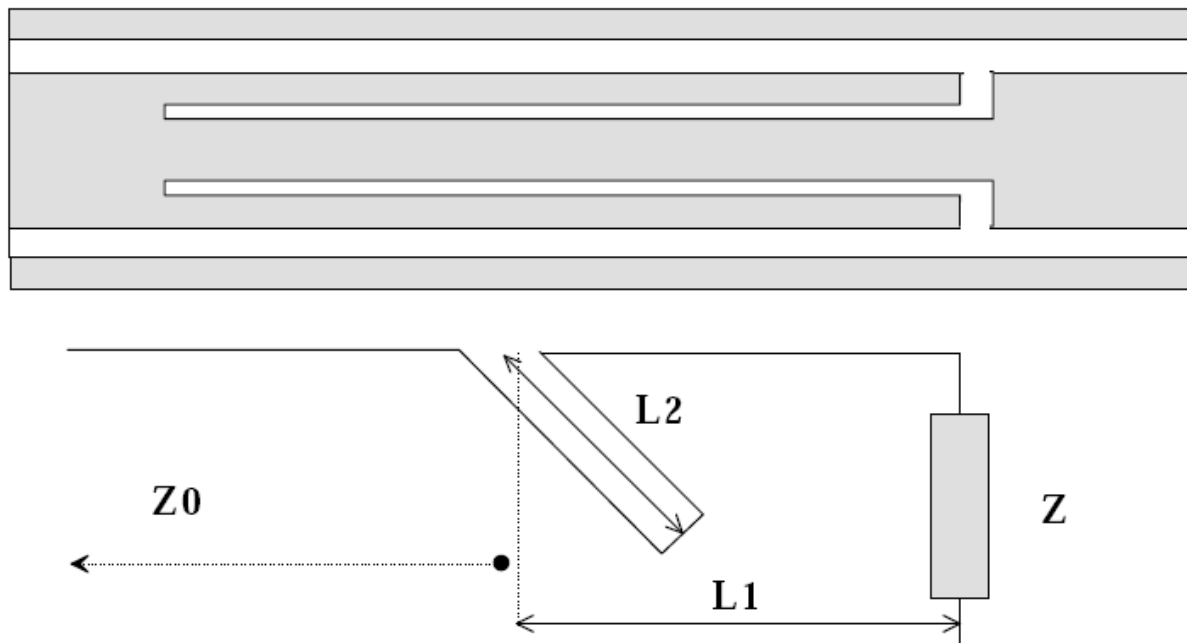
Výsledná závislost vstupního koeficientu odrazu na frekvenci je vynesena na obr. 20.

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

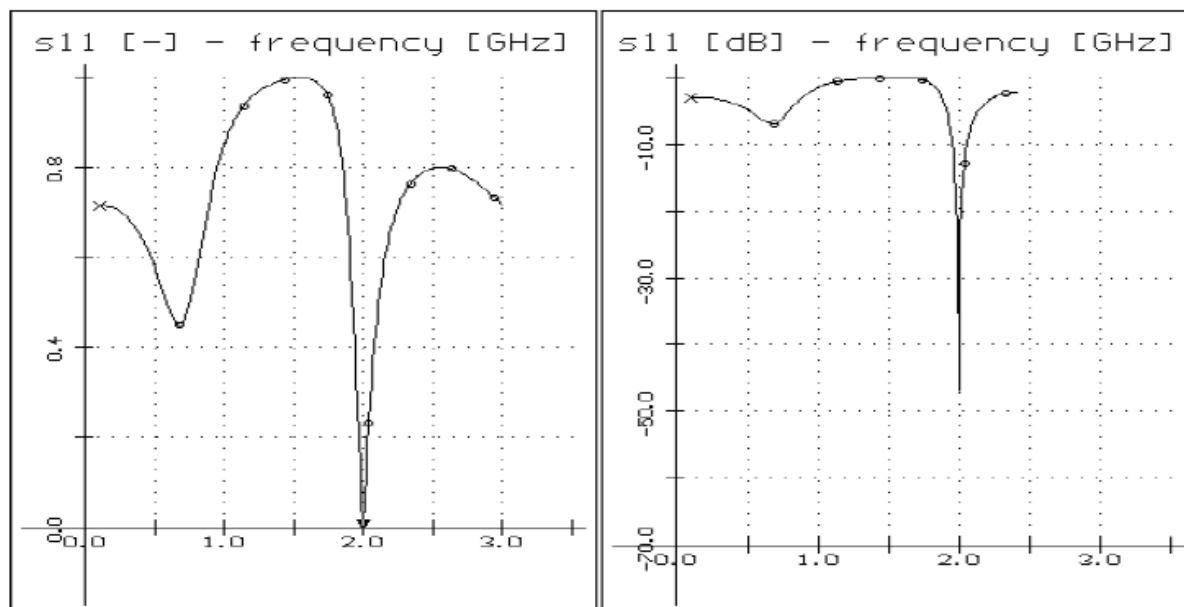
Úloha C.: Přizpůsobte impedanci z příkladu G. na frekvenci 2 GHz paralelním připojením pahýlu na konci otevřeného.

Impedanční přizpůsobení

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



Obr. 19. Přizpůsobovací obvod k příkladu G. Dole schématický obvod, nahoře provedení sériového pahýlu v koaxiálním vedení.



Obr. 20. Vypočtená závislost koeficientu odrazu na frekvenci.