

4.2 Vzájemné impedance

Základní teorie

Vyzařující prvky (dipóly, smyčky ap.) jsou obvykle sdružovány do anténní soustavy a napájeny ze společného zdroje především s cílem dosáhnout požadovaného **směrového diagramu vyzařování**.

Při návrhu napájecího systému soustavy antén je třeba postihnout i vzájemné ovlivňování mezi prvky soustavy a určit skutečnou hodnotu impedance na vstupu každého prvku soustavy. Znalost těchto údajů umožní určit vstupní proudy každého prvku i proudy na napájecích svorkách soustavy, ale také modifikovat uspořádání napájecího systému tak, aby bylo dosaženo vhodné velikosti **vstupní impedance** anténní soustavy jako celku.

V této kapitole nejprve se zaměříme na způsob výpočtu vstupní impedance lineární antény (dipólu) **metodou indukovaných elektromotorických napětí**. Postup pak snadno rozšíříme tak, aby bylo možno vypočítat impedance jednotlivých prvků v anténní soustavě.

Impedanci záření Z_{Σ} antény můžeme považovat za konstantu úměrnosti mezi komplexním výkonem P_{Σ} , který anténa vyzařuje, a kvadrátem vztážného proudu I

$$P_{\Sigma} = Z_{\Sigma} |I|^2 = Z_{\Sigma vst} |I_{vst}|^2 = Z_{\Sigma m} |I_m|^2. \quad (4.2A.1)$$

Vztažným proudem bývá buď vstupní proud prvku I_{vst} nebo hodnota proudu I_m v **kmitně stojaté vlny**. Protože proudy I_{vst} a I_m na téže anténě (i za stejných podmínek) se většinou liší, ale vyzařovaný výkon je stejný, liší se i hodnoty **impedance záření** – hodnota $Z_{\Sigma vst}$ vztažená ke vstupnímu proudu I_{vst} a hodnota $Z_{\Sigma m}$ vztažená k proudu v kmitně I_m .

U antén se zanedbatelnými ztrátami je impedance záření $Z_{\Sigma vst}$ shodná se **vstupní impedancí** antény Z_{vst} vypočtenou z poměru napětí U_{vst} a proudu I_{vst} na vstupních svorkách prvku

$$U_{vst} = Z_{vst} I_{vst}. \quad (4.2A.2)$$

Takto definované hodnoty vstupní impedance Z_{vst} jsou zpravidla udávány pro základní typy antén. Jsou to hodnoty platné pro antény umístěné ve **volném prostoru**, tedy relativně vzdálené od jiných antén či objektů. Konkrétní postup při výpočtu impedance Z_{vst} , využívající vyzařovaného výkonu, je uveden ve **vrstvě B**.

V anténní soustavě se jednotlivé prvky antény (prvky soustavy) navzájem ovlivňují a impedance každého z nich závisí na tom, jaké prvky jsou v okolí a jak jsou tyto prvky rozmístěny a buzené. Abychom mohli vzájemný vliv posoudit a vypočítat, pozměníme si nejprve náš pohled na rovnici (4.2A.2).

Předpokládejme, že v anténě byl nějakým způsobem vybuzen proud I . Ten je charakterizován proudem I_{vst} a nějakou funkcí **proudové distribuce**. Anténa září a všude ve svém okolí vytváří jistou intenzitu elektrického pole E , která je (mimo jiné) úměrná proudu v anténě. Jistá intenzita pole E_t vznikne i na povrchu samotné antény. Anténa tak současně funguje jako anténa přijímací (nedokáže totiž rozlišit, zda na ni dopadá *cizí* nebo *její vlastní* záření) a výsledkem příjmu je pak jisté napětí na vstupních svorkách antény. Napětí U_{vst} v rovnici (4.2A.2) tedy můžeme považovat za napětí, vzniklé na anténě příjmem vlastního záření. To je úměrné velikosti proudu I_{vst} na jejím vstupu a konstantou úměrnosti je veličina Z_{vst} (**činitel vlastní vazby**, vlastní impedance).

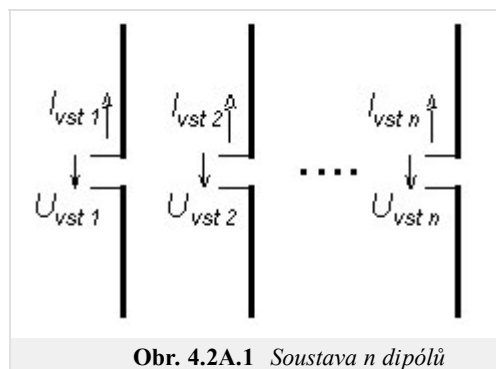
Je snadné rozšířit předchozí úvahu na anténní soustavu. V soustavě také existuje na povrchu každého prvku nějaká intenzita pole E_t . K ní ovšem přispívá nejen vlastní záření tohoto prvku, ale i záření všech ostatních prvků.

Na obr. 4.2A.1 je nakreslena soustava n prvků (dipólů), buzených proudy $I_{vst i}$ na jejich vstupních svorkách. V analogii s (4.2A.2) jsou tedy vstupní napětí jednotlivých prvků určena následující soustavou rovnic

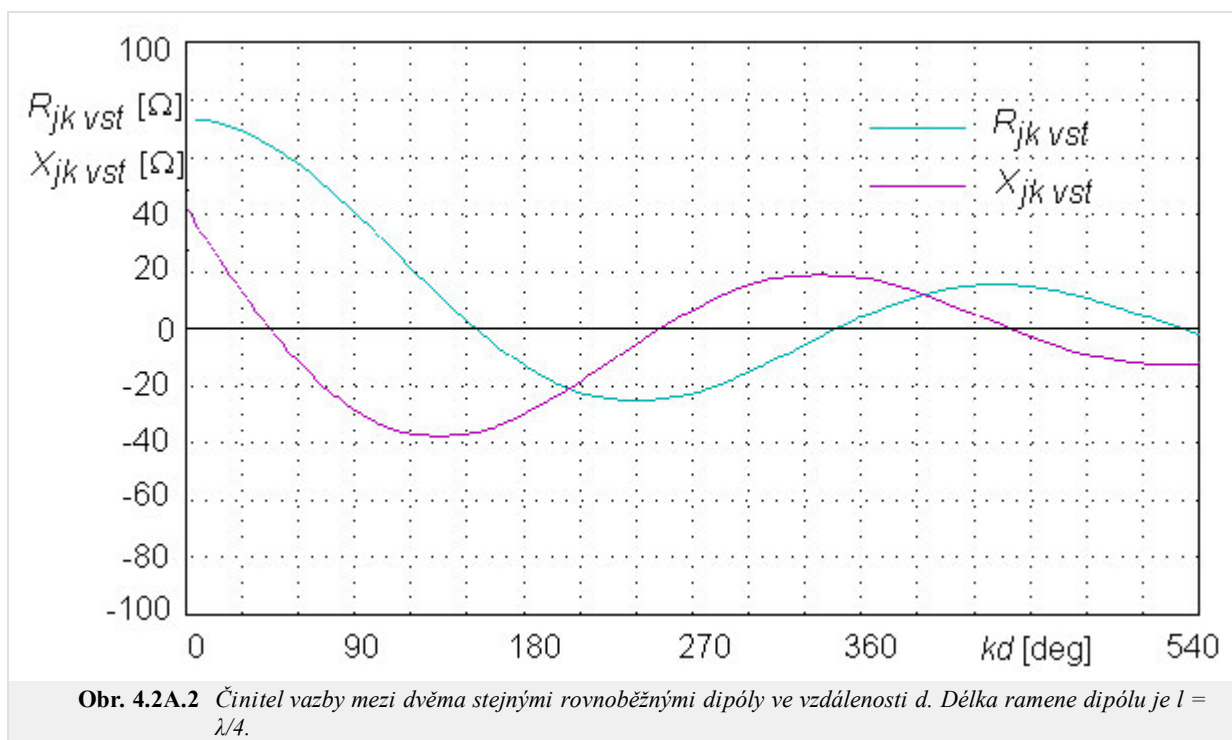
$$\begin{aligned} U_{vst1} &= Z_{11} I_{vst1} + Z_{12} I_{vst2} + \dots + Z_{1n} I_{vstn} \\ U_{vst2} &= Z_{21} I_{vst1} + Z_{22} I_{vst2} + \dots + Z_{2n} I_{vstn} \\ &\vdots \\ U_{vstn} &= Z_{n1} I_{vst1} + Z_{n2} I_{vst2} + \dots + Z_{nn} I_{vstn} \end{aligned} \quad (4.2A.3)$$

Impedanční koeficienty Z_{jk} vyjadřují vzájemnou vazbu mezi j -tým a k -tým prvkem a bývají nazývány **činitelé vazby** nebo **vzájemné impedance**. Činitelé vazby jsou komplexní veličiny a platí, že $Z_{jk} = Z_{kj}$. Jejich číselné hodnoty závisí na tvaru, rozměrech a vzájemné poloze těchto prvků a také na rozložení proudu na nich.

Koeficient Z_{jj} je **činitelem vlastní vazby** (vlastní impedancí), určuje vztah proudu a napětí na vstupu prvku umístěného mimo soustavu a je roven impedanci záření osamocené j -tého prvku ve volném prostoru.



Typický průběh závislosti složek činitelů vzájemné vazby $Z_{jk} = R_{jk} + jX_{jk}$ na vzdálenosti d (zadané v součinu s vlnovým číslem $k = 2\pi/\lambda$) mezi dvěma rovnoběžnými dipóly stejné délky je zobrazen na obr. 4.2A.2.



Hodnoty činitelů vazby závisí dosti složitým způsobem na rozměrech a vzdálenosti prvků. Reálná i imaginární složka činitele vazby nabývá kladných i záporných hodnot a jejich největší hodnoty se zmenšují při zvětšování vzdálenosti d mezi prvky, takže vliv velmi vzdálených prvků (několik vlnových délek) je pak malý.

Hodnoty činitelů vazby, uváděné pro technickou potřebu v grafech, jsou často vztaženy ke kmitně proudu. Přepočítání na vstupní svorky je možno provést pomocí sinusové funkce pro rozložení proudu na anténě

$$Z_{jkvst} = \frac{Z_{jkm}}{\sin^2(kl)}, \quad (4.2A.4)$$

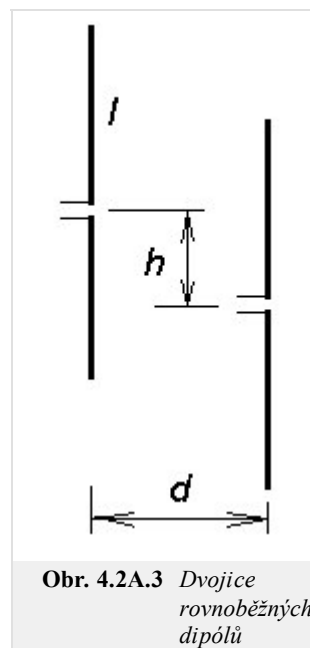
kde $kl = (2\pi/\lambda)l$, pokud délka antény l není blízká k celistvým násobkům $\lambda/2$.

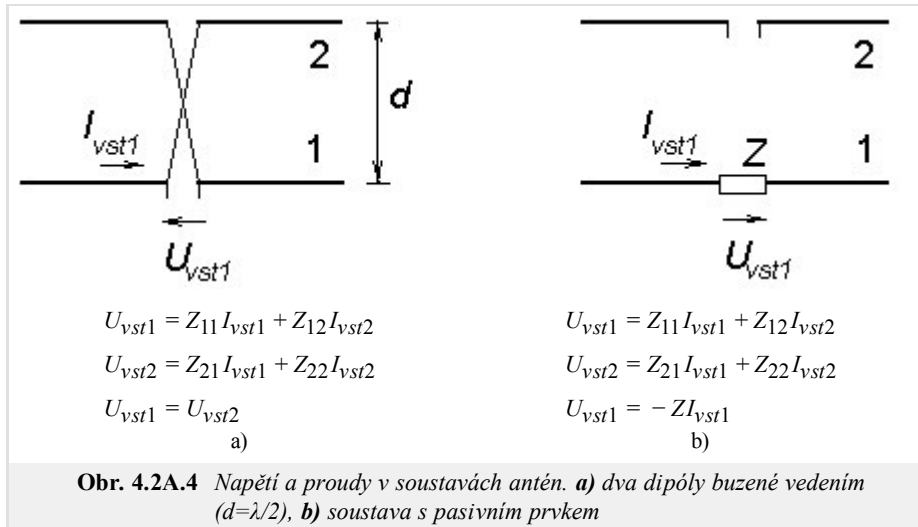
Přesnější hodnoty činitelů vazby je možno získat využitím výpočetního programu, dostupného ve vrstvě C. Ten poskytuje hodnoty činitelů vzájemné vazby Z_{jk} , vztažené ke kmitně nebo ke vstupu pro dvojici rovnoběžných dipólů se stejnou délkou ramen a se stojatou proudovou vlnou na vodičích dipólů. Délka ramene dipólu l , vzdálenost mezi dipóly d a velikost osového posuvu napájecích svorek dipólů h (obr. 4.2A.3) se zadávají v součinu s vlnovým číslem $k = 2\pi/\lambda$. Grafické vyjádření závislosti velikostí obou složek činitelů vzájemné vazby R_{jk} a X_{jk} na změnách zvolené veličiny (l , d nebo h) je výhodné při sledování vlivu změn prostorového uspořádání anténní soustavy na impedanční poměry na jejich prvcích.

Stejným způsobem je možno získat i hodnoty složek impedance záření Z_{zi} na vstupu osamoceně umístěného prvku, zadáme-li vzdálenost mezi prvky d rovnou poloměru a vodiče prvku.

Při výpočtu napěťových a proudových poměrů v soustavě n prvků je třeba určit $2n$ nezávislých veličin (n proudů a n napětí). Podle způsobu buzení je možno sestavit ještě dalších $(n-1)$ rovnic odpovídajících danému uspořádání napájecího systému a pro zvolenou velikost jednoho napětí nebo proudu pak vypočítat zbylých $(2n-1)$ neznámých veličin. U anténních soustav, kde jsou jednotlivé prvky buzeny soustavou vedení, komplikuje výpočet proudů skutečnost, že impedance každého prvku závisí také na proudech v ostatních prvcích. Tím jsou poměry na vedení a na zářičích vzájemně vázány. Poměrně jednoduchý bývá výpočet v soustavách s jedním napájeným prvkem – soustava s reflektorem (rovinným, úhlovým) nebo s pasivními prvky (anténa Yagi a pod.).

Při sestavování rovnic (4.2A.3) pro konkrétní situaci je třeba respektovat skutečnost, že směr napětí $U_{vst i}$ a proudu $I_{vst i}$ odpovídá napájení prvku generátorem. V případě pasivního prvku, u kterého je napětí na vstupních svorkách vyvoláno proudem I_{vst} tekoucím zátěží Z mezi jeho vstupními svorkami, je smysl napětí opačný, a tomu odpovídá i změna znaménka v (4.2A.3). Pro dvě typické situace jsou odpovídající soustavy rovnic uvedeny v obr. 4.2A.4.





Soustava rovnic (4.2A.3) umožňuje také výpočet poměru mezi kteroukoliv dvojicí neznámých veličin. Vstupní impedanci i -tého prvku Z_{vsti} pak získáme vydělením i -té rovnice (4.2A.3) vstupním proudem i -tého prvku I_{vsti}

$$Z_{vsti} = \frac{U_{vsti}}{I_{vsti}} = Z_{i1} \frac{I_{vst1}}{I_{vsti}} + Z_{i2} \frac{I_{vst2}}{I_{vsti}} + \dots + Z_{ii} + \dots + Z_{in} \frac{I_{vstn}}{I_{vsti}}. \quad (4.2A.5)$$

Impedance každého prvku anténní soustavy je tedy dána součtem jeho vlastní impedance Z_{ii} a příspěvků od ostatních prvků, závislých na součinu činitelů vazby Z_{jk} a odpovídajících proudů (amplitud i fází) tekoucích vstupními svorkami těchto prvků. Změna buzení některého z prvků anténní soustavy tedy vyvolá změnu impedancí všech prvků soustavy antén. Jako příklad uvedme výsledky získané pro soustavy podle obr. 4.2A.4. U dvojice dipólů napájených zkříženým vedením délky $d = \lambda/2$ (obr. 4.2A.4a) tečou v obou dipólech stejně velké proudy se stejnou fází a každý z dipólů má vstupní impedanci

$$Z_{vst1} = Z_{vst2} = Z_{11} + Z_{12} \frac{I_{vst2}}{I_{vst1}} = Z_{11} + Z_{12}. \quad (4.2A.6)$$

Impedance na svorkách dipólu "1" pak bude polovinou hodnoty Z_{vst1} . Pro dvojici půlvlnných dipólů ($kl = 90^\circ$) je $Z_{11} = (73,1 + j42,5) \Omega$ a $Z_{12} = (-12,5 - j30) \Omega$. Pak při soufázovém buzení (obr. 4.2A.4a) bude výsledná hodnota impedance každého z dipólů rovna $Z_1 = (60,6 + j12,5) \Omega$, při protifázovém buzení (nezkřížené vedení mezi dipóly na obr. 4.2A.4a) bude rovna rozdílu hodnot Z_{11} a Z_{12} a dostaneme výsledek $Z_1 = (85,6 + j72,5) \Omega$. Stejný výsledek bychom dostali pro dipól umístěný ve vzdálenosti $\lambda/4$ před rovinnou vodivou plochou (dipól s rovinným reflektorem). Impedance na svorkách dipólu "1" v obr. 4.2A.4a (impedance soustavy) bude polovinou vypočtené hodnoty Z_1 , tedy $Z_{soust} = (30,3 + j6,2) \Omega$.

Vstupní impedance dipólu "2" na obr. 4.2A.4b bude dána vztahem

$$Z_{vst2} = Z_{22} - \frac{Z_{21}^2}{Z_{11}}. \quad (4.2A.7)$$

Dosazované hodnoty složek obou impedancí Z_{11} a Z_{12} musí být v obou případech vztaženy ke vstupnímu proudu I_{vst} dipólu.