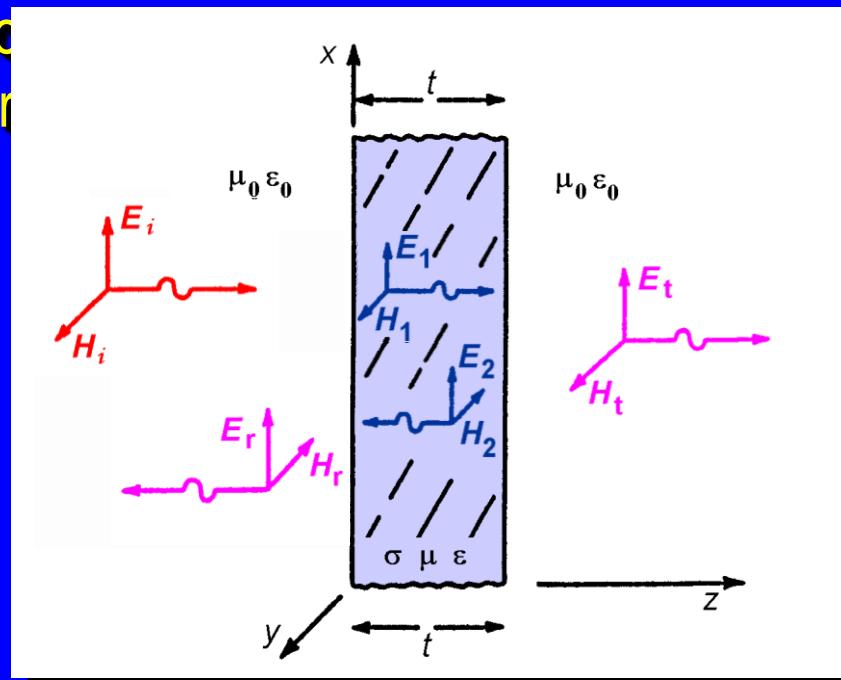


# ELEKTROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ

## Teoretické řešení

- neomezeně rozměrné
- kolmý dopad na stínění

věho kovu  
orší případ)



Koefficient stínění

$$K_S = \frac{E_t}{E_i}$$

nebo

$$K_S = \frac{H_t}{H_i}$$

# Efektivnost (účinnost) stínění (útlum stínění) – Shielding Effectiveness

$$SE = 20 \cdot \log \frac{1}{|K_S|} = 20 \cdot \log \left| \frac{E_i}{E_t} \right| \text{ [dB]}$$

$$SE = 20 \cdot \log \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4Z_0 Z_M} \cdot e^{\gamma t} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-2\gamma t} \right] \right|$$

charakteristický koeficient pro vlny rovinaté  
konstanta síření (vlnové číslo) rovinaté elektromagnetické vlny  
wevodivem prostředí stínící přepážky

$$SE \text{ [dB]} = R \text{ [dB]} + A \text{ [dB]} + M \text{ [dB]}$$

$$\gamma = \sqrt{\omega \mu \sigma} = (1 + j) \sqrt{\frac{\sigma}{2}} = \alpha + j\beta$$

# Útlum odrazem $R$

vzniká vlivem částečného odrazu energie vlny na impedančním rozhraní mezi vzduchem (dielektrikem) s impedancí  $Z_0$  a kovovou stěnou přepážky s impedancí  $Z_M$  a rovněž na „výstupním“ rozhraní mezi kovovou stěnou  $Z_M$  a dielektrikem (vzduchem)  $Z_0$ :

$$R = 20 \cdot \log \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4Z_0 Z_M} \right|$$

Při  $Z_0 \gg Z_M$  je

$$R \approx 20 \cdot \log \left| \frac{Z_0}{4Z_M} \right|$$



$$R \approx 20 \cdot \log \left( \frac{1}{4} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\omega \mu_r \epsilon_0}} \right)$$

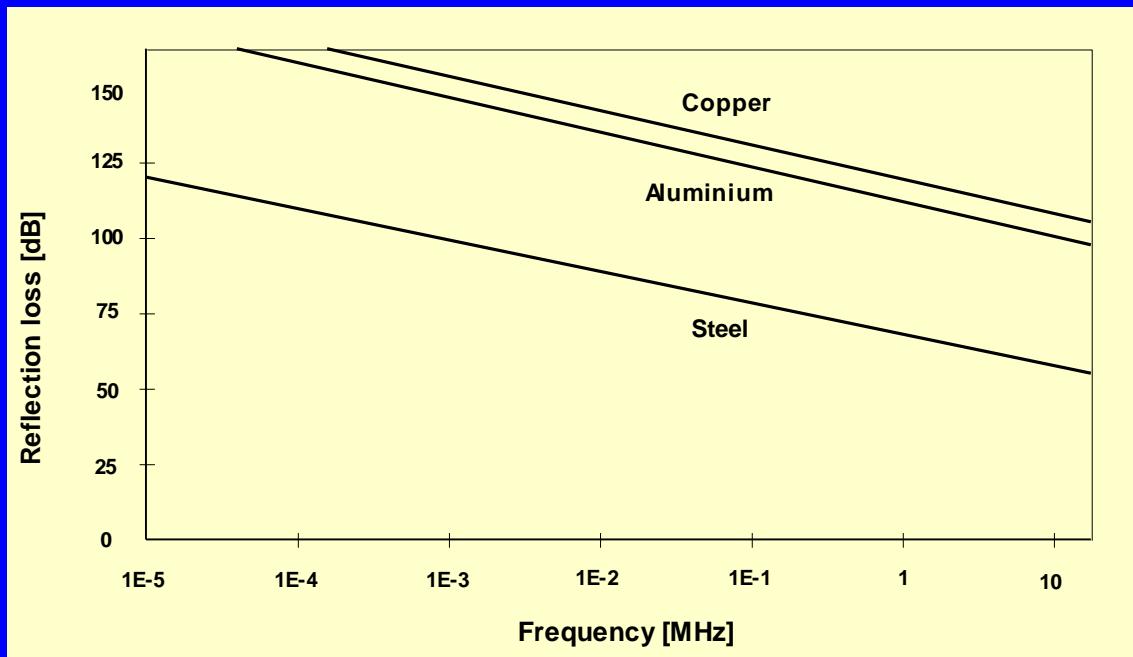
Útlum odrazem nezávisí na tloušťce  $t$  stínící kovové stěny ➔ účinné stínění lze vytvořit z tenké, ale vysoce vodivé ( $Z_0 \gg Z_M$ ) přepážky.

# Útlum odrazem R

$$R \approx 20 \cdot \log \left( \frac{1}{4} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\omega \mu_r \epsilon_0}} \right)$$

Hraniční vzdálenost – blízké, vzdálené pole

$$r = \frac{\lambda}{2\pi}$$



## Útlum reflexí

- ~ měr. vodivosti  $\sigma$
- ~  $1/\text{permeabilitě } \mu$
- ~ vzdálenosti  $r$   
(v blízkém poli)

## Absorpční útlum $A$

vzniká pohlcením části energie elektromagnetické vlny při jejím průchodu stínicí kovovou přepážkou o tloušťce  $t$  vlivem tepelných ztrát, tj. vlivem konečné vodivosti kovu stínicí přepážky :

$$A = 20 \cdot \log |e^{\gamma t}| = 20 \cdot \log e^{\alpha t} = 20 \cdot \log e^{\frac{t}{\delta}} \quad [\text{dB}]$$

Hloubka vniku elektromagnetického pole do kovového materiálu

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

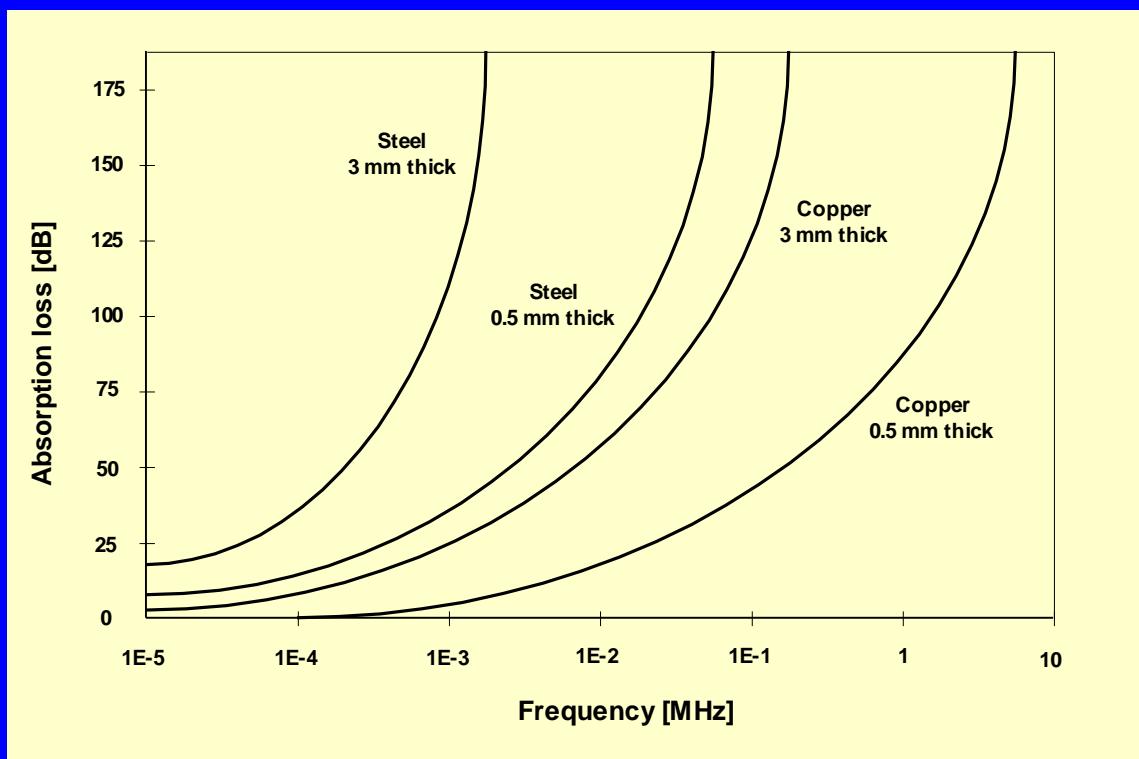


$$A = 8,69 \cdot \frac{t}{\delta} = 0,0069 \cdot t \cdot \sqrt{\omega \mu_r \sigma}$$

Absorpční útlum roste s druhou odmocninou tloušťky na dB stupnici. Vodivé feromagnetické materiály ( $\mu_r \gg 1$ ) mají přitom větší absorpční útlum než stejně vodivé nemagnetické materiály.

# Absorpční útlum A

$$A = 8,69 \frac{t}{\delta} [\text{dB}] \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$



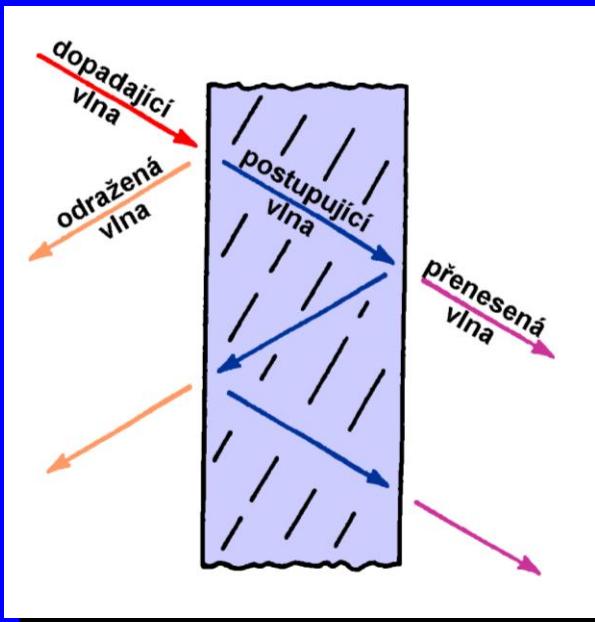
Útlum absorpcí

- ~ tloušťce t
- ~ permeabilitě  $\mu$
- ~ měr. vodivost  $\sigma$
- roste s 2 mocninou

# Útlum vlivem mnohonásobných odrazů $M$

vzniká díky opakovaným odrazům na vstupu a výstupu stínící kovové přepážky :

$$M = 20 \cdot \log \left| 1 - \left( \frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-\frac{2t}{\delta}} \cdot e^{-j \frac{2t}{\delta}} \right|$$



Je-li stínění z dobré vodivého kovu ( $Z_0 \gg Z_M$ ) a jeho tloušťka  $t$  je podstatně větší než hloubka vniku ( $t \gg \delta$ ), je  $M \approx 0 \text{ dB}$  a vliv mnohonásobných odrazů na celkové stínění lze zanedbat.

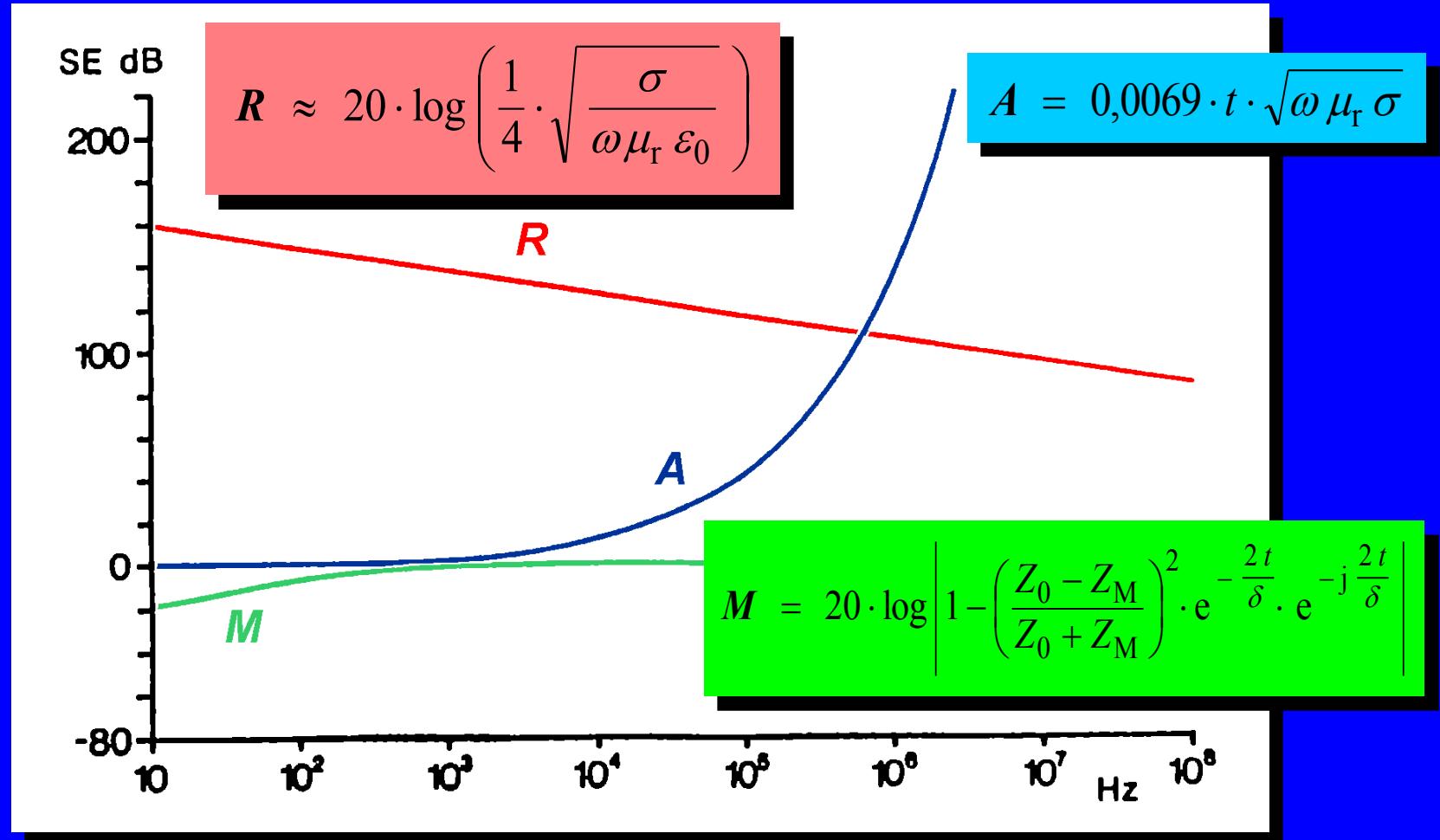


$$\text{SE [dB]} \approx R [\text{dB}] + A [\text{dB}]$$

# Celková účinnost stínění

$$\mathbf{SE} \text{ [dB]} = \mathbf{R} \text{ [dB]} + \mathbf{A} \text{ [dB]} + \mathbf{M} \text{ [dB]}$$

- Útlum odrazem **R** je funkcí poměru  $\sigma / \mu_r$ , zatímco absorpční útlum **A** je funkcí součinu těchto veličin  $\sigma \cdot \mu_r$ .
- Útlum odrazem **R** tvoří dominantní složku stínicího účinku na nízkých kmitočtech pro magnetické i nemagnetické kovové materiály.
- Na vysokých kmitočtech roste absorpční útlum **A** a vysoce převyšuje klesající útlum odrazem. Tento vzrůst na vysokých kmitočtech je přitom výraznější u magnetických kovových materiálů s  $\mu_r \gg 1$ .
- Na nízkých kmitočtech, kdy hloubka vniku  $\delta \gg t$ , příp. u velmi tenkých stínicích přepážek ( $t \ll \delta$ ) je hodnota útlumu mnohonásobnými odrazy **M záporná** a snižuje celkovou účinnost stínění **SE**. S rostoucím kmitočtem se velikost **M**  $\rightarrow 0$  dB a mnohonásobné odrazy v kovové přepážce nemají vliv na účinnost stínění.



Kmitočtový průběh jednotlivých složek účinnosti stínění  
měděné desky o tloušťce  $t = 1$  mm

**Vliv mnohonásobných odrazů  $M$**  na velikost celkové účinnosti stínění **SE** se může nepříznivě uplatňovat i na vyšších kmitočtech, je-li stínicí přepážka velice tenká ( $t \ll \delta$ ).



Přístrojové a počítačové stínicí „kryty“ vytvořené napařením či naprášením velmi tenkého kovového povlaku na vnitřní povrch nekovové (plastové) přístrojové skříně.

Tloušťka stínění	0,1 $\mu\text{m}$		1,25 $\mu\text{m}$		2,2 $\mu\text{m}$		22 $\mu\text{m}$	
Kmitočet [MHz]	1	1000	1	1000	1	1000	1	1000
Útlum odrazem $R$ [dB]	109	79	109	79	109	79	109	79
Absorpční útlum $A$ [dB]	0,014	0,44	0,16	5,2	0,29	9,2	2,9	92
Mnohonásobné odrazy $M$ [dB]	- 47	- 17	- 26	- 0,6	- 21	0,6	- 3,5	0
Účinnost stínění <b>SE</b> [dB]	62	62	83	84	88	90	108	171

# **Vliv otvorů a technologických netěsností na účinnost elektromagnetického stínění**

- **Otvory, štěrbiny a další otevření stínicí plochy** (např. dveře, okna, větrací otvory, štěrbiny a netěsnosti mezi jednotlivými kovovými plochami stínění, vstupní otvory pro přípojné kabely, vedení, příp. vnější mechanické ovládací prvky stíněného zařízení).
- **Špatně vodivé (vysokoimpedanční) části stínění** (vodivě nedokonalá spojení jednotlivých částí stínění, nedokonale vodivé průhledné plochy (skla) při požadavku vizuální kontroly zařízení).
- **Vnější přívodní kabely a přípojná vedení** (napájecí, signálové a datové kabely, jimiž se mohou dostávat elektromagnetické rušivé signály do vnitřního prostoru stínicího krytu).

# Vliv otvorů a technologických netěsností na S

Kruhový otvor poloměru  $a$

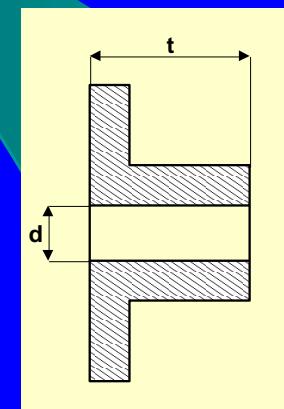
$$S = 20 \cdot \log \frac{\lambda}{2\pi a}$$

N kruhových otvorů s poloměrem  $a$

$$S = 20 \cdot \log \frac{\lambda}{2\pi a \cdot \sqrt{N}}$$

Kruhový otvor s průměrem  $d$  a tloušťkou stěny  $t$

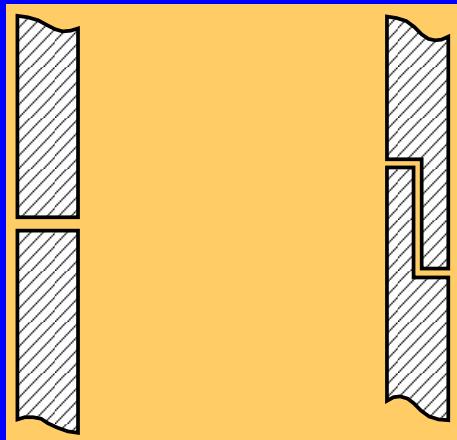
$$S = \frac{54,6 \cdot t}{\lambda_m} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{f}{f_m} \right)^2} \approx \frac{16t}{d}$$



Pravoúhlá štěrbina délky  $l$

$$S = 20 \cdot \log \frac{\lambda}{2l} + 27,2 \cdot \frac{t}{l}$$

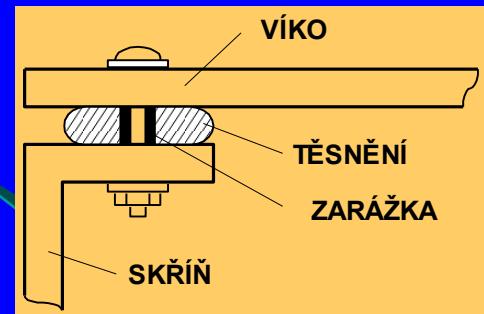
# Konstrukční úpravy pro zlepšené stínění



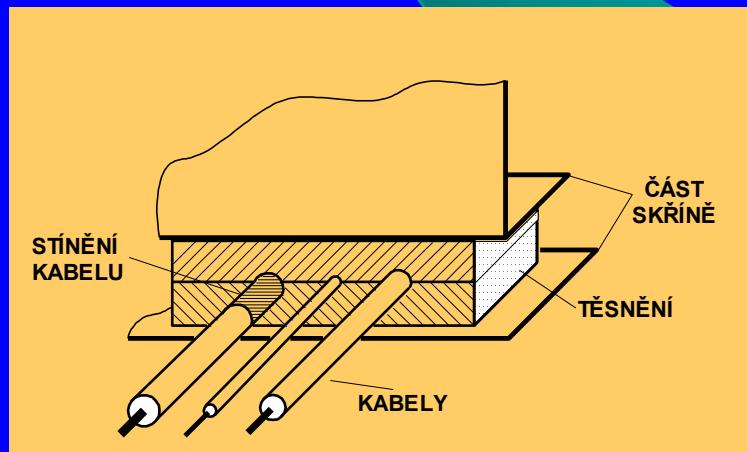
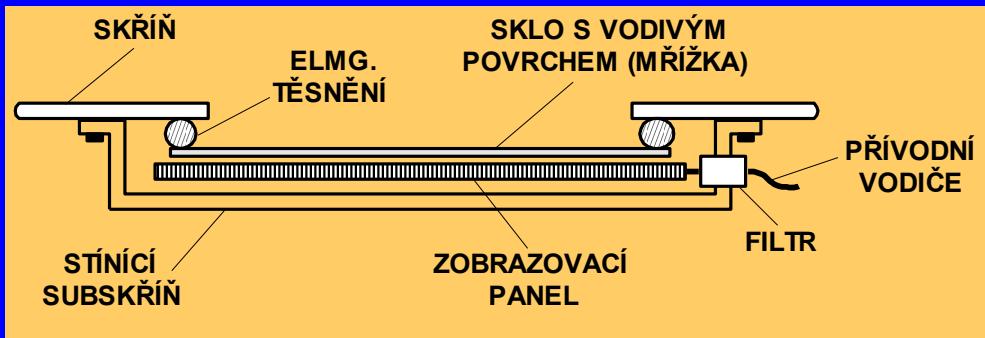
a)

b)

Spoje dělených skříní  
a) s větším průnikem  
b) lepší provedení



Elektromagnetické těsnění – detail spoje



Elektromagnetické těsnění – utěsnění vstupních kabelů

Konstrukce stíněného okna pro zobrazovací prvky

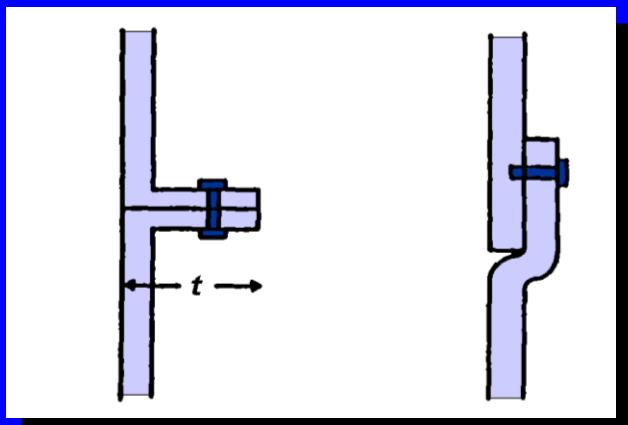
## Větrací a průchodkové sekce stínicích krytů



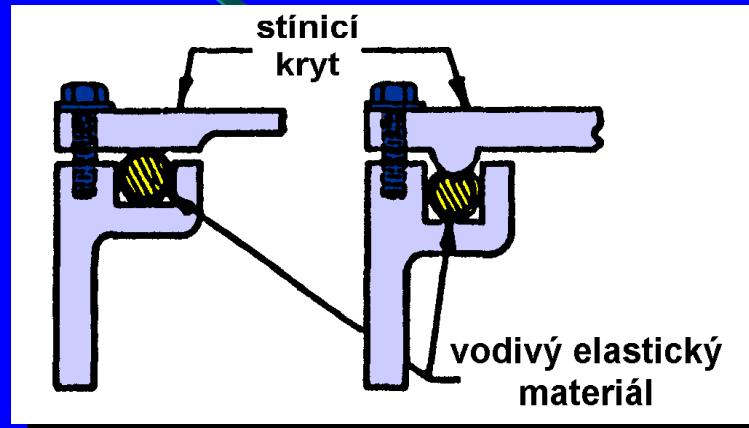
**honeycomb vents**

# Konstrukční zlepšení účinnosti stínění

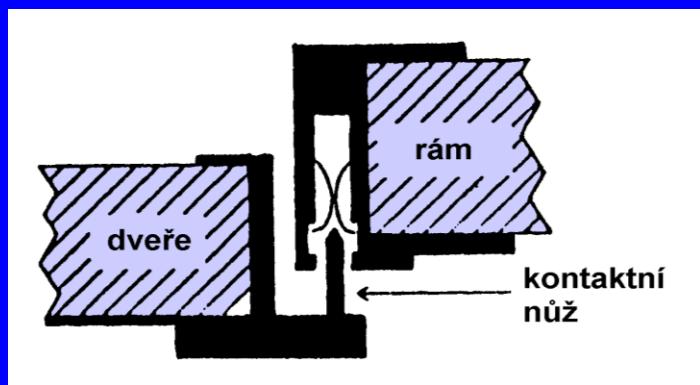
- vzájemným „dlouhým“ překryvem spojovaných částí



- použitím elasticích vodivých materiálů (past, silikonů aj.)



- použitím pružinových, příp. pérových nožových kontaktů na pohyblivých částech



# Hodnocení elektromagnetického stínění dle orientačních hodnot SE

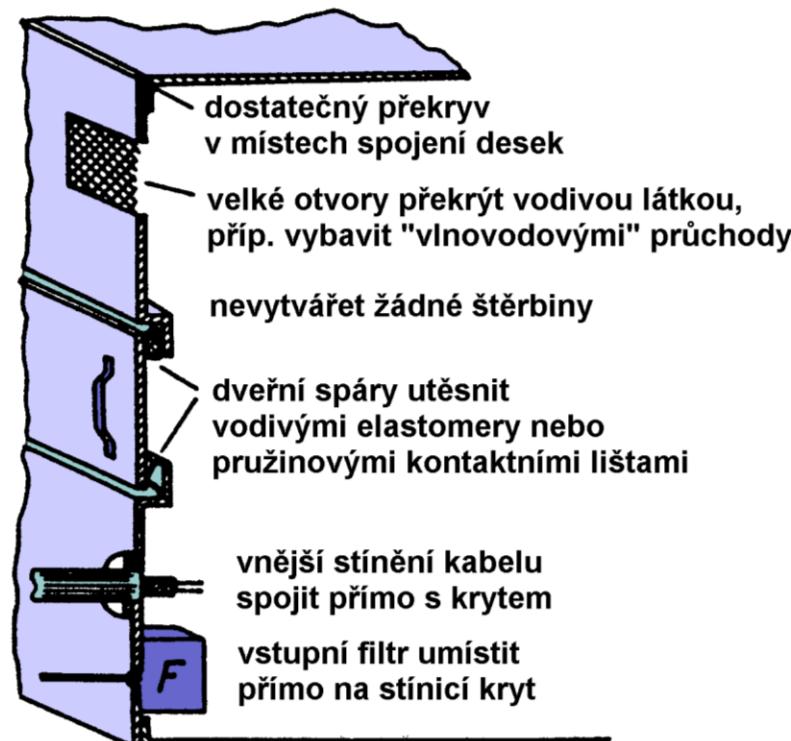
Účinnost stínění [dB]	Kategorie – hodnocení
0 ÷ 10	Nedostatečné stínění
10 ÷ 30	Stínění pro minimální požadavky
30 ÷ 60	Stínění dostačující pro většinu běžných požadavků
60 ÷ 90	Velmi dobré stínění
90 ÷ 120	Vysoko kvalitní stínění

# Zásady konstrukce stínění

- Volit dobré stínící materiál a jeho tloušťku
  - dobré magnetické materiály pro stínění nízkofrekvenčních magnetických polí
  - dobré vodivé materiály pro stínění vysokofrekvenčních elektrických polí
- Výsledná efektivnost určena netěsnostmi
  - malý počet netěsností (otvorů, štěrbin)
  - velké množství malých otvorů lepší než jeden velký
  - větší hloubka netěsnosti - větší útlum
  - dobře propojené části stínění (uzemnění)
  - dobře napojit stínění na přívodní vodiče
- Elektromagnetická těsnění
  - malý útlum pro nízké frekvence a magnetické pole
  - závislost útlumu na stlačení
  - dobře volit materiál (galvanická koroze)
- Stíněná okna
  - převládá útlum odrazem
  - malý útlum magnetických polí
- Vodivé nanášené povrchy
  - malý útlum pod 1 MHz a magnetických polí

Cin <  $\mu$  nestíní mag. pole

# Zásady správné konstrukce SOUHRN elektronagнетický stíněných krytů



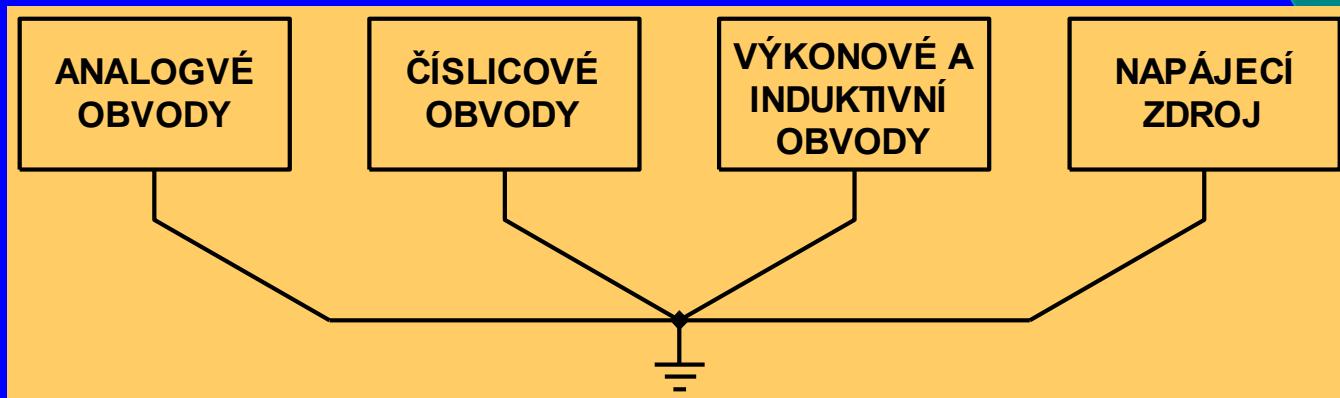
chybná konstrukce z hlediska EMC

zlepšená konstrukce pro vyšší účinnost stínění

# Zemnění systému

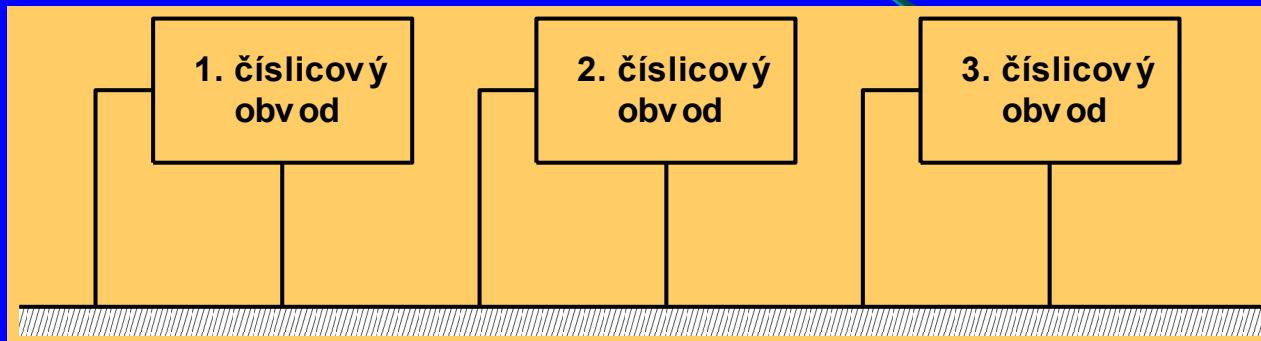
„Zemnění je cesta s nízkou impedancí pro proud vracející se zpět ke zdroji.“

- ◆ Jednobodové
  - ◆ eliminuje společné impedance
  - ◆ odstraňuje zemní smyčky pro nf
  - ◆ vhodné do 1 MHz
  - ◆ pro vyšší frekvence nevhodné
    - zvýšení impedance zem. spoje
    - dlouhé spoje - antény



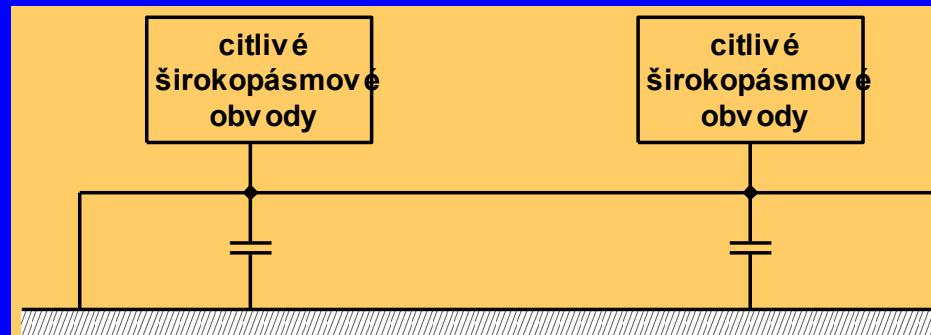
## ◆ Vícebodové

- ◆ vhodné pro frekvence nad 10 MHz
- ◆ vhodné pro číslicové obvody
- = nevhodné pro analogové obvody
  - vznik zem. smyček

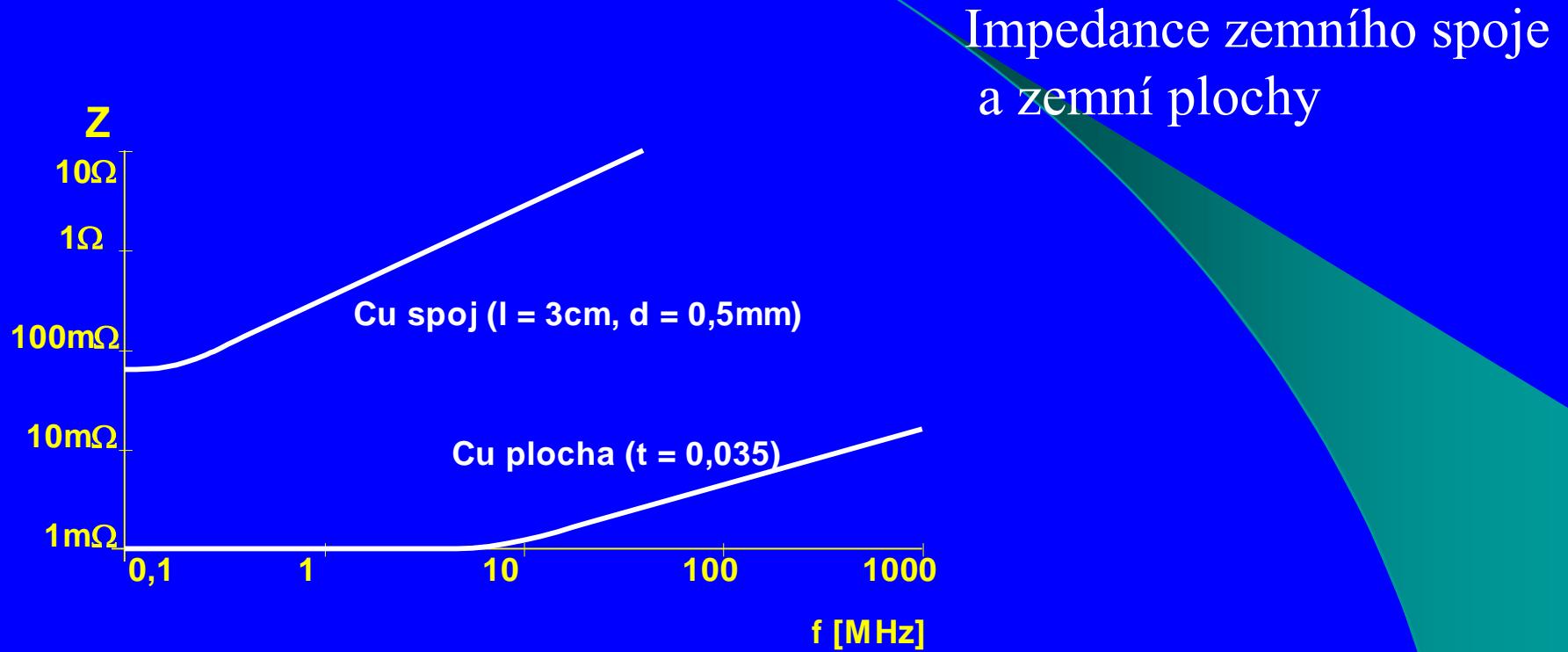


## ◆ Hybridní

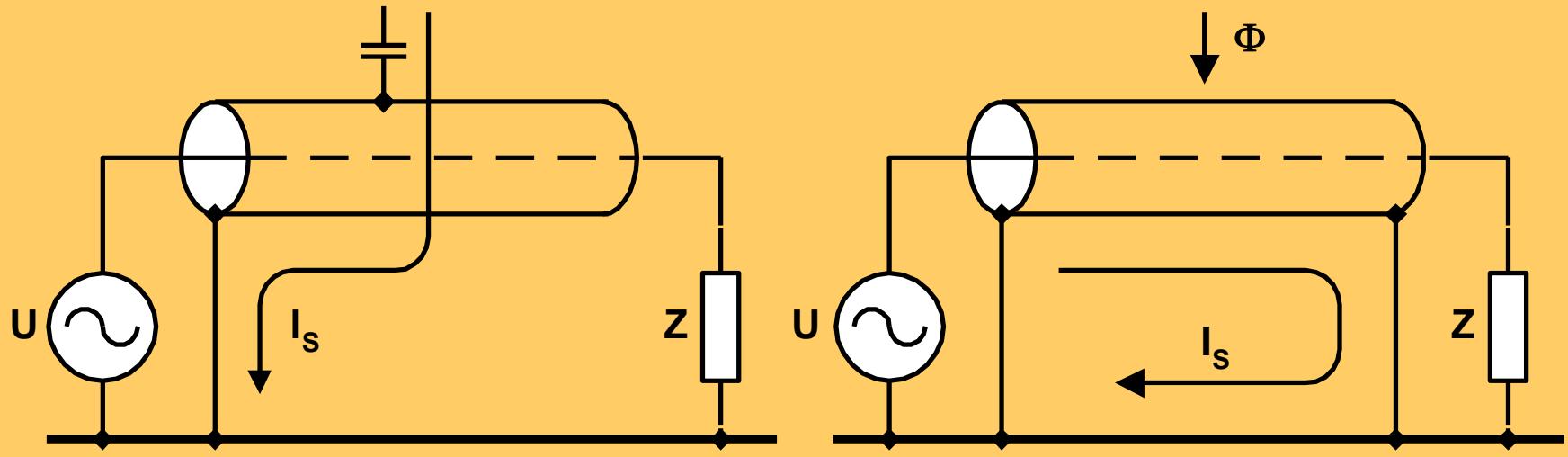
- ◆ jednobodové přímo (nf)
- ◆ vícebodové přes kapacity (vf)
- = vznik rezonancí



# Zemnění na DSP - zemní plocha



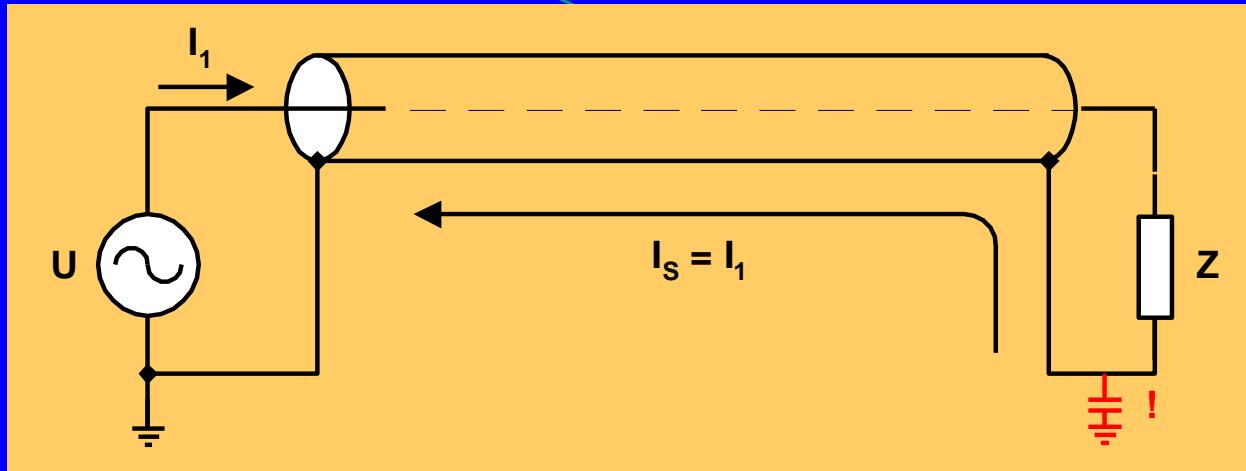
# Uzemnění stínění vodičů



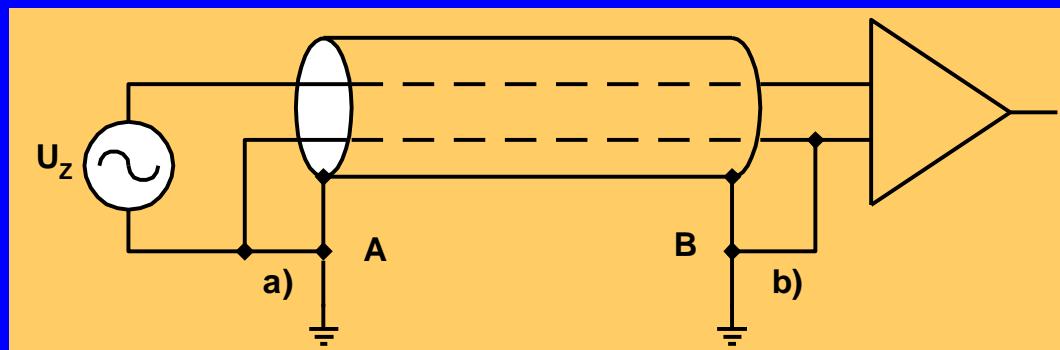
Princip stínění pro kapacitní  
rušivou vazbu

Princip stínění pro induktivní  
rušivou vazbu

# Uzemnění stínění vodičů



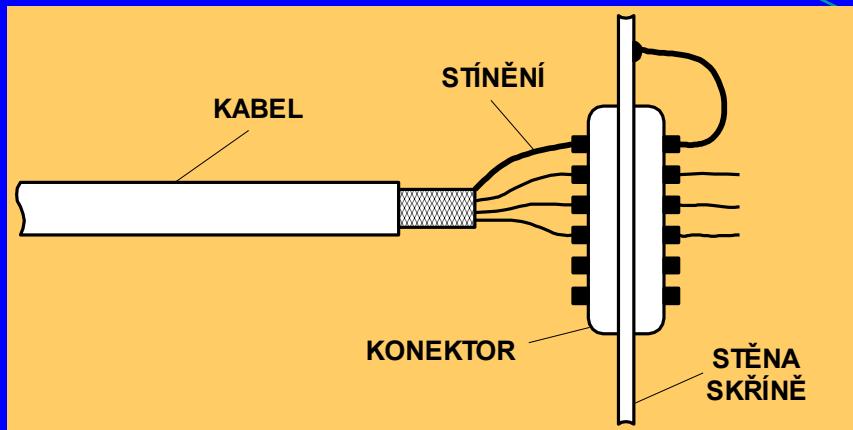
Jednobodové uzemnění stínění proti induktivní rušivé vazbě (nízké kmitočty)



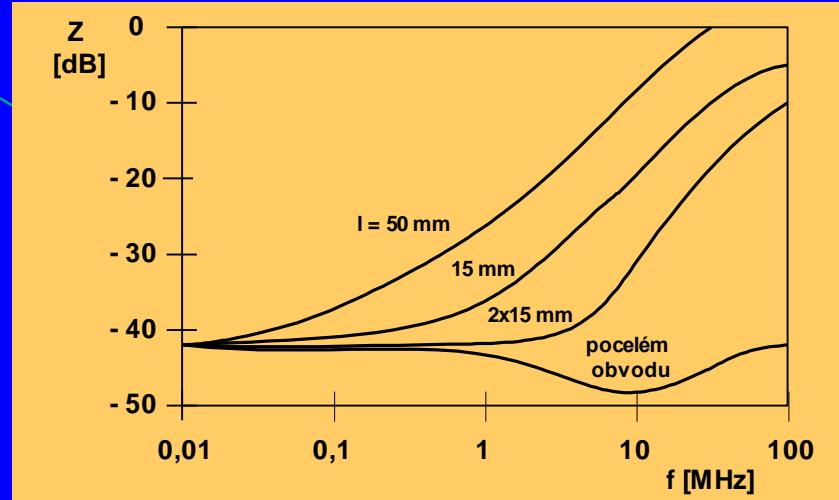
Různé způsoby připojení stínění

- a) zdroj signálu je uzemněn
- b) příjemce signálu je uzemněn

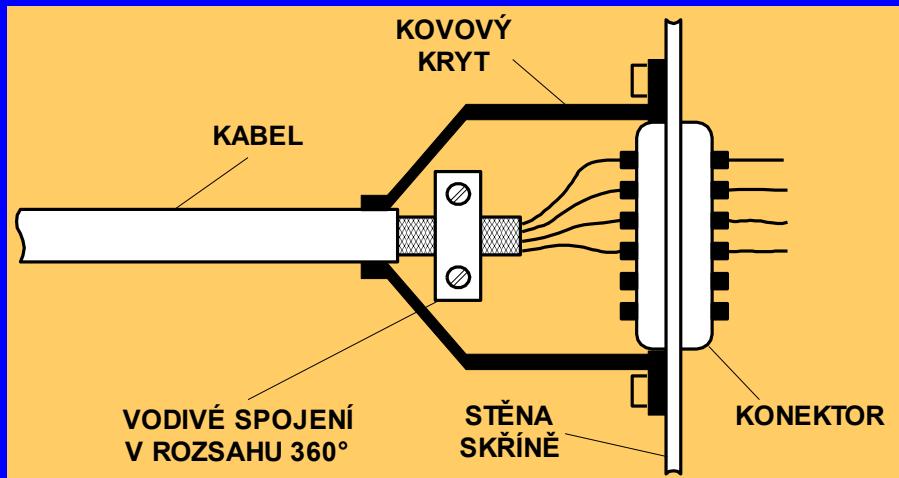
# Konstrukční provedení uzemnění stínění vodičů



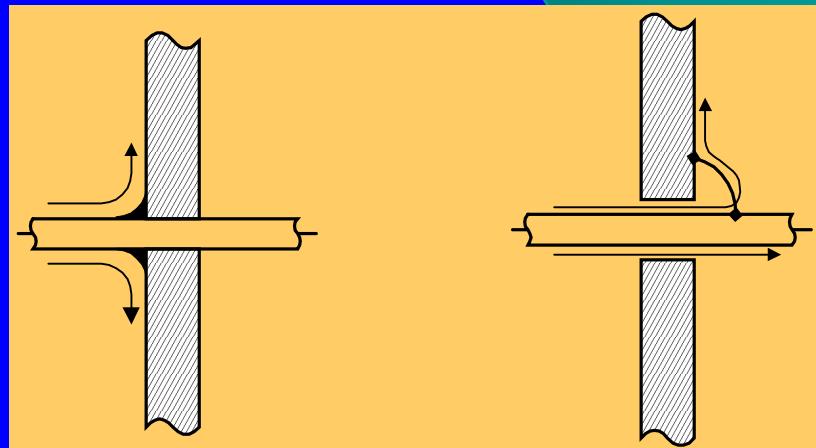
Nevhodné napojení stínění vodiče



Vliv zkroucené délky stínění na jeho impedanci

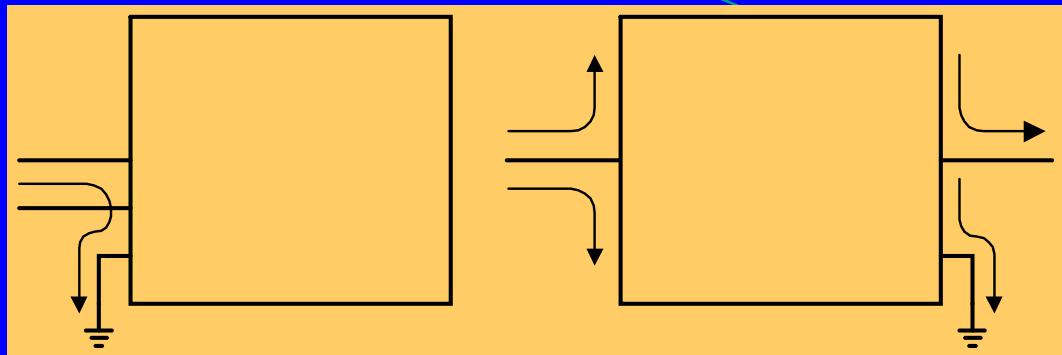


Správné napojení stínění vodiče na konektorovou hlavici



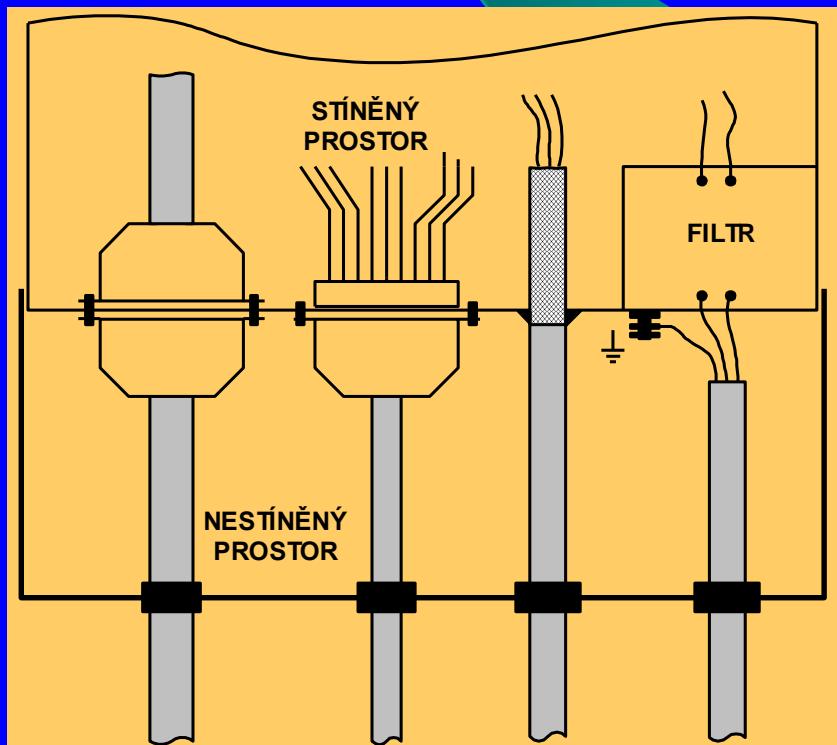
Správné a nevhodné napojení stínění vodiče na stínící skříň

# Napojení kabelů do zařízení



Vhodné a nevhodné napojení vodičů do zařízení

Správné napojení vodičů do  
stíněného prostoru skříně  
(vstupní panel)



# Přípojná vedení – stíněné vodiče

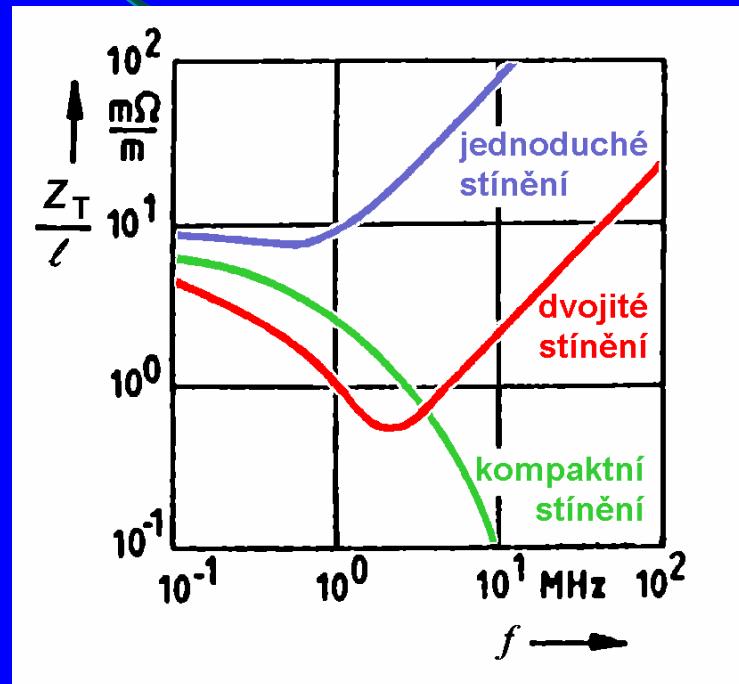
## Stínění koaxiálních vodičů

$$Z_T(\omega) = \frac{U_r(\omega)}{I_r(\omega) \cdot l}$$

Vazební přenosová impedance  
stíněného kabelu

$I_r$  – ruš. proud na vnější straně  
pláště stínění

$U_r$  – podélný úbytek napětí na  
vnitřní straně pláště stínění



## Kvalitní stínění koaxiálních vodičů

- jednoduché stínění, pletený pláště, malá „oka“
- dvojité stínění
- plný (kompaktní) stínící pláště

Kmitočtová závislost vazební impedance

# Stínění koaxiálních kabelů

je nejčastěji charakterizováno tzv. **vazební (přenosovou) impedancí** (angl. *Transfer Impedance*)  $Z_T$ .

Protéká-li po **vnější straně** stínicího pláště koaxiálního kabelu rušivý proud  $I_r$ , vzniká na **vnitřním povrchu** pláště podélný úbytek napětí  $U_r$ . Jeho velikost je určena konstrukcí a tloušťkou stínicího pláště a hloubkou vniku elektromagnetického pole do materiálu pláště při daném kmitočtu. Poměr tohoto vnitřního úbytku napětí a vnějšího rušivého proudu v pláště vztažený na jednotku délky koaxiálního kabelu udává **vazební (přenosovou) impedanci**  $Z_T$  stínění kabelu

$$Z_T(\omega) = \frac{U_r(\omega)}{I_r(\omega) \cdot l}$$

pro délku kabelu  $l \ll \lambda/4$  na pracovním kmitočtu.

# Komerčně vyráběné koaxiální kably



jednoduché pletené stínění



dvojité pletené spojené stínění



dvojité pletené izolované stínění  
(triaxialní kabel)



jednoduché kompaktní stínění



pletené a kompaktní stínění

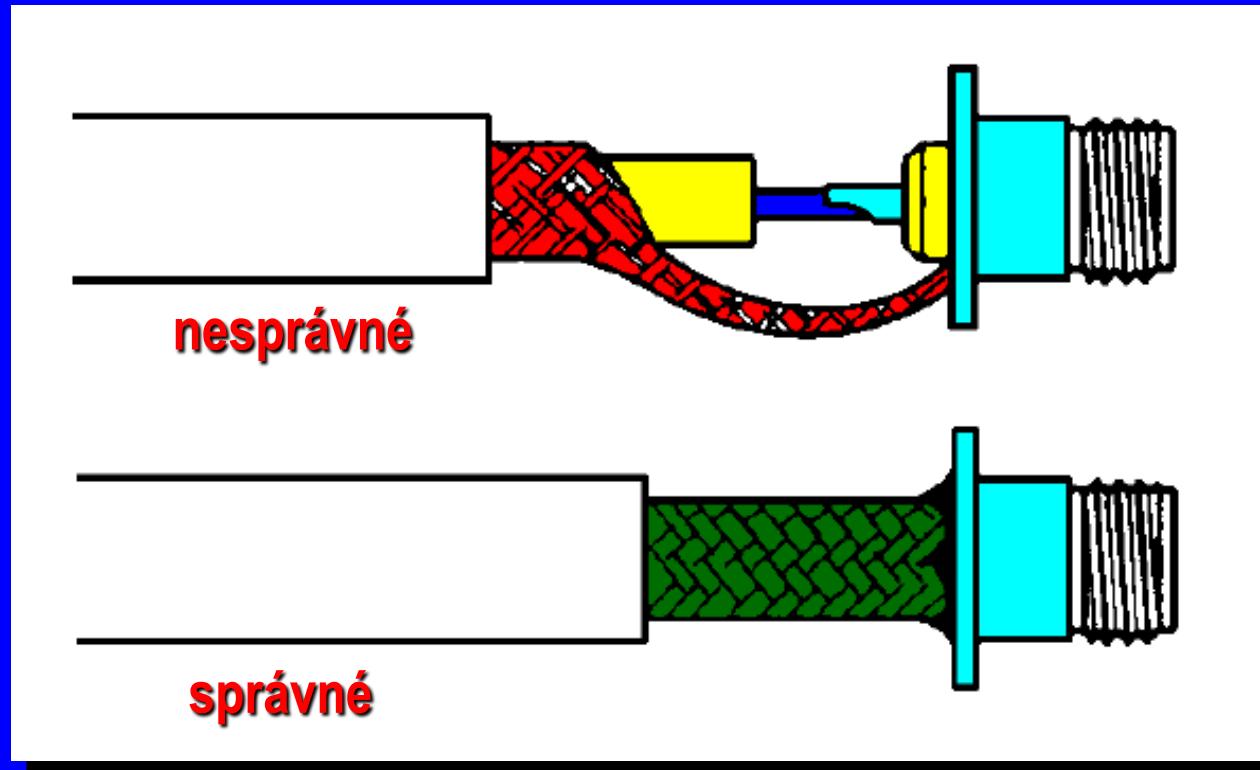


jednoduché vinuté stínění

# Vazební impedance stínění koaxiálních konektorů

- Při spojování konektoru se stínicí pláště obou jeho částí musí pevně spojit (uzavřít) dříve, než se propojí vnitřní „živé“ vodiče obou kabelů a naopak, při rozpojování se musí nejprve rozpojit „živé“ vodiče a teprve pak stínicí pláště obou částí konektoru. Případné „jiskření“ a parazitní impulzy, které mohou vznikat při spojování či rozpojování elektricky „živých“ vodičů, tak odeznějí ve stavu, kdy vnější stínění konektoru je již či ještě uzavřeno.
- Elektricky „živé“ (vnitřní) části konektoru musí být kvalitně izolovány od vnějšího kovového pláště. Důvodem je jednak bezpečnost, jednak zamezení přenosu elektrostatických výbojů vznikajících mezi obsluhující osobou a vnějším pláštěm konektoru do jeho vnitřního prostoru.
- Elektrická, mechanická a elektromagnetický „těsná“ konstrukce konektoru musí odolat všem změnám pracovních podmínek, tj. otřesům, vibracím, korozi, kolísání teploty apod.

# Spojení stíniciho pláště kabelu a konektoru



EMC  
je krásná věda,  
život je strom zeleny

