

Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

redakce nakladatelství BEN – technická literatura
redakce@ben.cz

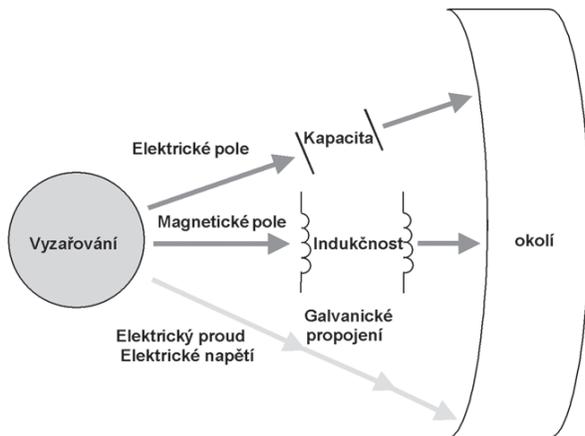


kapitola 3

TYPY VZÁJEMNÝCH VAZEB

3.1	Induktivní vazba	32
3.2	Kapacitní vazba	44
3.3	Galvanická vazba	61
3.4	Elektromagnetická vazba	111

Vzájemné elektromagnetické ovlivňování jednotlivých zařízení se může uskutečňovat přenosovými cestami, které jsou znázorněny na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Způsoby vzájemného elektromagnetického ovlivňování

Z hlediska teoretické analýzy problematiky je zřejmé, že přenos vyzařované energie mezi jednotlivými zkoumanými zařízeními se uskutečňuje následujícími způsoby:

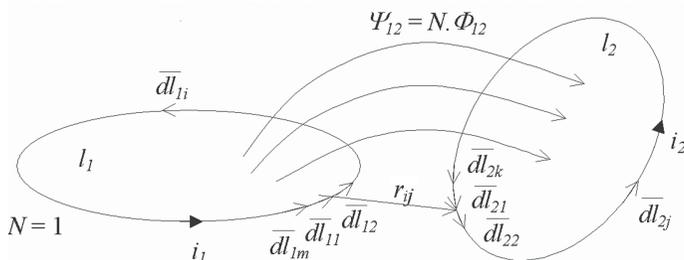
- induktivní vazbou
- kapacitní vazbou
- galvanickou vazbou
- elektromagnetickým polem

3.1 Induktivní vazba

Induktivní magnetická vazba je typická pro dvě galvanicky oddělené smyčky elektrického obvodu, přičemž alespoň jednou z nich protéká časově proměnlivý proud, který v jejím okolí vytváří časově proměnlivé magnetické pole. Vliv jednoho obvodu na druhý je v tomto případě dán velikostí proudu, strmostí jeho nárůstu nebo poklesu, magnetickými vlastnostmi prostředí, ve kterém se obvody nacházejí a geometrickým uspořádáním obou obvodů.

3.1.1 Teoretická analýza

Pro prediktivní vyšetření vlivu induktivní vazby vycházíme z následujícího případu, kdy budeme uvažovat dvě samostatné elektrické smyčky s délkami l_1 a l_2 , kterými protékají proudy i_1 a i_2 , přičemž budeme vyšetřovat vliv smyčky l_1 na elektrické poměry ve smyčce l_2 , jak je to uvedeno na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Analyzovaný případ induktivní vazby

Vycházíme z Maxwellovy rovnice pro kvazistacionární pole

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

která vyjadřuje zákon elektromagnetické indukce v diferenciálním tvaru. Její vyjádření v integrálním tvaru dostaneme tak, že vytvoříme plošné integrály obou stran.

$$\int_S \text{rot } \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (3.2)$$

Aplikací Stokesovy věty dostaneme

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3.3)$$

Výsledný tvar indukovaného napětí u_{i2} , vyvolaného více (N) závitů proudovodiče, je dán vztahem

$$u_{i2} = -N \cdot \frac{\partial \phi_{12}}{\partial t} = -\frac{\partial \psi_{12}}{\partial t} \quad (3.4)$$

přičemž

$$l_1 = \sum_{i=1}^m dl_{1i} \quad (3.5)$$

$$l_2 = \sum_{j=1}^k dl_{2j} \quad (3.6)$$

jsou délky jednotlivých smyček.

Pro většinu vyšetřovaných obvodů ve výkonovém polovodičovém měničích platí, že se jedná jenom o jednoduché smyčky, pro které budeme uvažovat počet závitů $N=1$, a tedy $\Psi = \Phi$.

Magnetický tok spřažený s vyšetřovaným obvodem, který je vyvolán proudem v jiném obvodu, je dinován jako

$$\psi_{12} = M \cdot i_1 \quad (3.7)$$

Dosažením vztahu (3.7) do rovnice (3.4), definující indukované napětí, dostaneme

$$u_{i2} = -M \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (3.8)$$

kde koeficient M představuje vzájemnou indukčnost mezi oběma obvody.

Definování celkového magnetického toku $\psi_1 = \Phi_1$, který je vyvolán prvním obvodem a protéká plochou druhé smyčky, můžeme uskutečnit pomocí integrálu vektorového potenciálu magnetického pole podél uzavřené smyčky l_2 .

$$\phi_{12} = \oint_{l_2} \bar{A}_2 \cdot d\bar{l}_2 \quad (3.9)$$

kde vektorový potenciál \bar{A}_2 pole vláknového vodiče, kterým protéká proud i_1 , je dán vztahem

$$\bar{A}_2 = \frac{\mu \cdot i_1}{4\pi} \oint_{l_1} \frac{d\bar{l}_1}{r_{12}} \quad (3.10)$$

Dosažením výrazu (3.10) do vztahu (3.9) pro magnetický tok Φ_{12} dostaneme

$$\phi_{12} = \oint_{l_2} \left[\frac{\mu \cdot i_1}{4\pi} \oint_{l_1} \frac{d\bar{l}_1}{r_{12}} \right] \cdot d\bar{l}_2 = \frac{\mu \cdot i_1}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{d\bar{l}_1 \cdot d\bar{l}_2}{r_{12}} \quad (3.11)$$

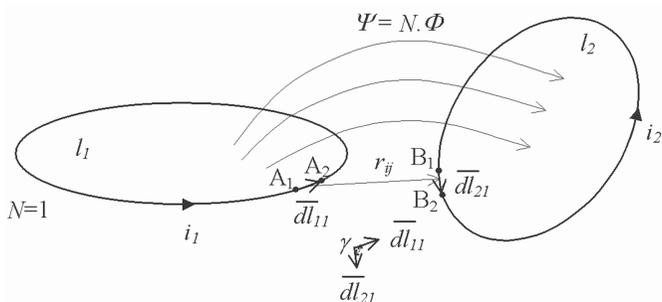
Vydělením levé a pravé strany rovnice hodnotou proudu i_1 získáme hledaný výraz pro velikost koeficientu vzájemné indukčnosti M .

$$M = \frac{\mu}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{d\bar{l}_1 \cdot d\bar{l}_2}{r_{12}} \quad (3.12)$$

Jestli v následujícím kroku vykonáme přechod od integrálu po uzavřené smyčce k sumě délkových elementů v příslušné smyčce, tak dostaneme upravené výrazy pro velikost vzájemné indukčnosti M a taktěž i indukovaného napětí u_i v diferenciální podobě.

$$M = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k M_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{\mu}{4\pi} \frac{d\vec{l}_i \cdot d\vec{l}_{2j}}{r_{ij}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{\mu}{4\pi} \frac{dl_i \cdot dl_{2j} \cdot \cos \gamma_{ij}}{r_{ij}} \quad (3.13)$$

$$u_i = -\frac{di}{dt} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{\mu}{4\pi} \frac{dl_i \cdot dl_{2j} \cdot \cos \gamma_{ij}}{r_{ij}} \quad (3.14)$$



Obr. 3.3 Délky, definovány souřadnicemi koncových bodů v 3D prostoru

Dle obr. 3.3 pro prostorový vektor délky \vec{dl}_{11} , který je definován počátečním bodem A_1 se souřadnicemi (A_{x1}, A_{y1}, A_{z1}) a koncovým bodem A_2 se souřadnicemi (A_{x2}, A_{y2}, A_{z2}) platí

$$\vec{dl}_{11} = (A_{x2} - A_{x1}) \cdot \vec{x}_0 + (A_{y2} - A_{y1}) \cdot \vec{y}_0 + (A_{z2} - A_{z1}) \cdot \vec{z}_0 \quad (3.15)$$

Podobně pro prostorový vektor délky \vec{dl}_{21} platí

$$\vec{dl}_{21} = (B_{x2} - B_{x1}) \cdot \vec{x}_0 + (B_{y2} - B_{y1}) \cdot \vec{y}_0 + (B_{z2} - B_{z1}) \cdot \vec{z}_0 \quad (3.16)$$

Skalární součin vektorů délek můžeme v třírozměrném kartézském prostoru vyjádřit pomocí souřadnic počátečních a koncových bodů obou vektorů.

$$\vec{dl}_{11} \cdot \vec{dl}_{21} = (A_{x2} - A_{x1}) \cdot (B_{x2} - B_{x1}) + (A_{y2} - A_{y1}) \cdot (B_{y2} - B_{y1}) + (A_{z2} - A_{z1}) \cdot (B_{z2} - B_{z1}) \quad (3.17)$$

Pro vzdálenost r_{12} , středů těchto dvou vektorů bude platit

$$r_{12} = \sqrt{\left(\left(B_{x1} + \frac{|B_{x2} + B_{x1}|}{2} \right) - \left(A_{x1} + \frac{|A_{x2} + A_{x1}|}{2} \right) \right)^2 + \left(\left(B_{y1} + \frac{|B_{y2} + B_{y1}|}{2} \right) - \left(A_{y1} + \frac{|A_{y2} + A_{y1}|}{2} \right) \right)^2 + \left(\left(B_{z1} + \frac{|B_{z2} + B_{z1}|}{2} \right) - \left(A_{z1} + \frac{|A_{z2} + A_{z1}|}{2} \right) \right)^2} \quad (3.18)$$

Na základě předchozích rovnic můžeme pro výpočet velikosti vzájemné indukčnosti mezi dvojicí smyček elektrických obvodů, umístěných v třírozměrném prostoru, odvodit výslednou rovnici.

$$M = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{\mu}{4\pi} \frac{(A_{x2i} - A_{x1i}) \cdot (B_{x2j} - B_{x1j}) + (A_{y2i} - A_{y1i}) \cdot (B_{y2j} - B_{y1j}) + (A_{z2i} - A_{z1i}) \cdot (B_{z2j} - B_{z1j})}{\sqrt{\left(\left(B_{x1j} + \frac{|B_{x2j} + B_{x1j}|}{2} \right) - \left(A_{x1i} + \frac{|A_{x2i} + A_{x1i}|}{2} \right) \right)^2 + \left(\left(B_{y1j} + \frac{|B_{y2j} + B_{y1j}|}{2} \right) - \left(A_{y1i} + \frac{|A_{y2i} + A_{y1i}|}{2} \right) \right)^2 + \left(\left(B_{z1j} + \frac{|B_{z2j} + B_{z1j}|}{2} \right) - \left(A_{z1i} + \frac{|A_{z2i} + A_{z1i}|}{2} \right) \right)^2}} \quad (3.19)$$

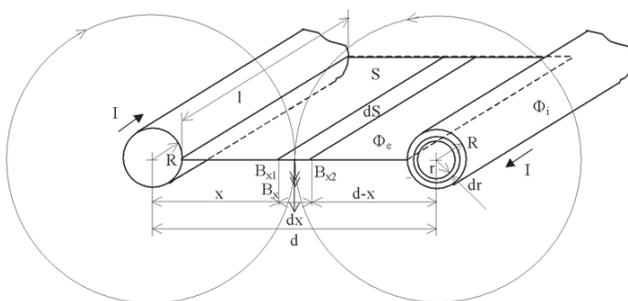
Stejným způsobem můžeme vyjádřit i velikost indukovaného napětí.

$$u_i = - \frac{di}{dt} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{\mu}{4\pi} \frac{(A_{x2i} - A_{x1i}) \cdot (B_{x2j} - B_{x1j}) + (A_{y2i} - A_{y1i}) \cdot (B_{y2j} - B_{y1j}) + (A_{z2i} - A_{z1i}) \cdot (B_{z2j} - B_{z1j})}{\sqrt{\left(\left(B_{x1j} + \frac{|B_{x2j} + B_{x1j}|}{2} \right) - \left(A_{x1i} + \frac{|A_{x2i} + A_{x1i}|}{2} \right) \right)^2 + \left(\left(B_{y1j} + \frac{|B_{y2j} + B_{y1j}|}{2} \right) - \left(A_{y1i} + \frac{|A_{y2i} + A_{y1i}|}{2} \right) \right)^2 + \left(\left(B_{z1j} + \frac{|B_{z2j} + B_{z1j}|}{2} \right) - \left(A_{z1i} + \frac{|A_{z2i} + A_{z1i}|}{2} \right) \right)^2}} \quad (3.20)$$

Popis napětí v libovolní smyčce zkoumaného elektrického obvodu (kupříkladu smyčka č. 1), na kterou působí celkově $k - 1$ jiných elektrických smyček, kterými protéká proud, prostřednictvím jejich magnetických polí dostaneme aplikací II. Kirchhoffova zákona a metodou superpozice.

$$u_{cc1} = R_{c1} \cdot \dot{i}_1 + L_{c1} \cdot \frac{d\dot{i}_1}{dt} + \frac{1}{C_{c1}} \int \dot{i}_1 \cdot dt + \sum_{j=1}^{k-1} u_{ij} \quad (3.21)$$

kde u_{cc1} je hodnota napětí napětíového zdroje zapojeného v příslušné smyčce, R_{c1} je celkový ohmický odpor popisované smyčky, L_{c1} je celková vlastní indukčnost popisované smyčky, C_{c1} je celková kapacita popisované smyčky a u_{ij} je velikost indukovaného napětí vyvolaného jinou j -tou elektrickou smyčkou.



Obr. 3.4 Délky definovány souřadnicemi koncových bodů v 3D prostoru

Indukčnosti vodičů jednotlivých zkoumaných smyček (mimo indukčností zařazených jako pasivní prvky v obvodu) můžeme s využitím obr. 3.4 stanovit následujícím postupem.

$$B_x = B_{x1} + B_{x2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi \cdot x} + \frac{\mu_0 I}{2\pi \cdot (d - x)} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \Phi_e &= \int_S (B_{x1} + B_{x2}) \cdot dS = \int_R^{d-R} (B_{x1} + B_{x2}) \cdot l \cdot dx = \\ &= \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \int_R^{d-R} \left[\frac{dx}{x} + \frac{dx}{d-x} \right] = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} [\ln x - \ln(d-x)]_R^{d-R} = \\ &= \frac{\mu_0 I l}{2\pi} [\ln(d-R) - \ln R - \ln R + \ln(d-R)] = \frac{\mu_0 I l}{\pi} \ln \frac{d-R}{R} \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$L_e = \frac{\Phi_e}{I} = \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \frac{d-R}{R} \quad (3.24)$$

$$L_i = \frac{2W_m}{I^2} \quad (3.25)$$

$$w_m = \frac{1}{2} \mu \cdot H^2 \quad (3.26)$$

$$H = \frac{I}{2\pi R^2} \cdot r \quad (3.27)$$

$$w_m = \frac{1}{2} \mu \frac{I^2}{4\pi^2 R^4} \cdot r^2 \quad (3.28)$$

$$dV = 2\pi \cdot r \cdot l \cdot dr \quad (3.29)$$

$$w_m \cdot dV = \frac{1}{2} \mu \frac{I^2}{4\pi^2 R^4} \cdot r^2 \cdot 2\pi \cdot r \cdot l \cdot dr = \frac{\mu \cdot l \cdot I^2}{4\pi R^4} \cdot r^3 \cdot dr \quad (3.30)$$

$$W_m = \int_V w_m \cdot dV = \frac{\mu \cdot l \cdot I^2}{4\pi R^4} \cdot \int_0^R r^3 \cdot dr = \frac{\mu \cdot l \cdot I^2}{4\pi R^4} \cdot \frac{R^4}{4} = \frac{\mu \cdot l \cdot I^2}{16\pi} \quad (3.31)$$

$$L_i = \frac{\mu \cdot l}{8\pi} \quad (3.32)$$

$$L = L_e + L_i = \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \frac{d-R}{R} + \frac{\mu \cdot l}{8\pi} \quad (3.33)$$

Pro řešení otázky EMC u celého zkoumaného zařízení nebo konfigurací zařízení prostřednictvím induktivní magnetické vazby je zapotřebí vykonat obvodovou simulační analýzu pro všechny na sebe působící smyčky, což z matematického hlediska vede k řešení soustavy k integrálně-diferenciálních rovnic.

$$u_{cc1} = R_{c1} \cdot i_1 + L_{c1} \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_{c1}} \int i_1 \cdot dt + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^k u_{ij} \quad (3.34)$$

:

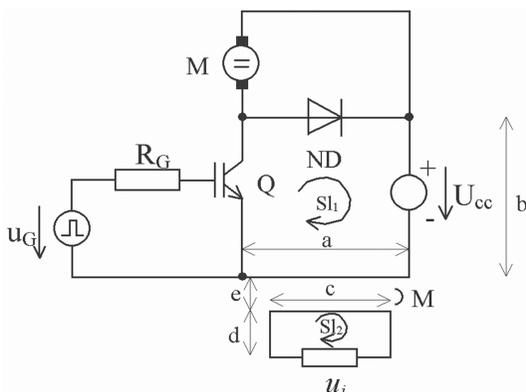
$$u_{cck} = R_{ck} \cdot i_k + L_{ck} \cdot \frac{di_k}{dt} + \frac{1}{C_{ck}} \int i_k \cdot dt + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^k u_{ij}$$

3.1.2 Simulace a měření

Kvůli získání konkrétní prediktivní informace o jedné složce EMC – působení induktivní magnetické vazby, je zapotřebí získat informace o časovém průběhu potenciálu v libovolném uzlu zkoumané konfigurace. K tomuto účelu je možné s výhodou využít existující simulační počítačové programy, které reprezentuje kupříkladu celosvětově využívaný program PSPICE.

V námi zkoumaném případě dle obr. 3.5 bude indukčnost první smyčky Sl_1 výkonového obvodu dána výrazem

$$L_1 = L_{e1} + L_{i1} = \frac{\mu_0 b}{\pi} \ln \frac{a-R}{R} + \frac{\mu_0 a}{\pi} \ln \frac{b-R}{R} + \frac{\mu \cdot 2 \cdot (a+b)}{8\pi} \quad (3.35)$$



Obr. 3.5 Schéma vyšetřovaných obvodů

Indukčnost L_2 snímací smyčky Sl_2 , určené pro snímání indukovaného napětí, můžeme vypočítat

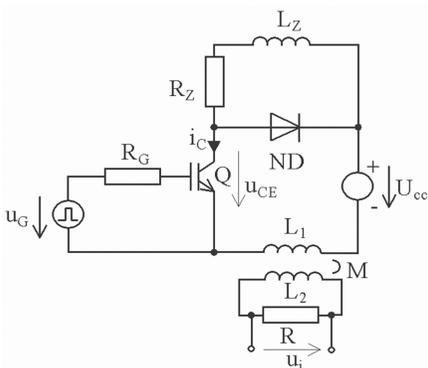
$$L_2 = L_{e2} + L_{i2} = \frac{\mu_0 c}{\pi} \ln \frac{d-R}{R} + \frac{\mu_0 d}{\pi} \ln \frac{c-R}{R} + \frac{\mu \cdot 2 \cdot (c+d)}{8\pi} \quad (3.36)$$

kde R jsou poloměry použitých vodičů. Geometrické rozměry zkoumaných obvodů jsou následující: $a = 0,2$ m, $b = 0,3$ m, $c = 0,1$ m, $d = 0,05$ m, $e = 0,005$ m. Použité jsou měděné vodiče s poloměry $R = 0,0006$ m a relativní perměabilitou $\mu_r = 0,991$. Po dosazení a výpočtu získáme $L_1 = 1,294$ mH, $L_2 = 0,294$ mH a taktéž $M = 477,4$ nH. Koeficient vazby můžeme vypočítat pomocí vztahu

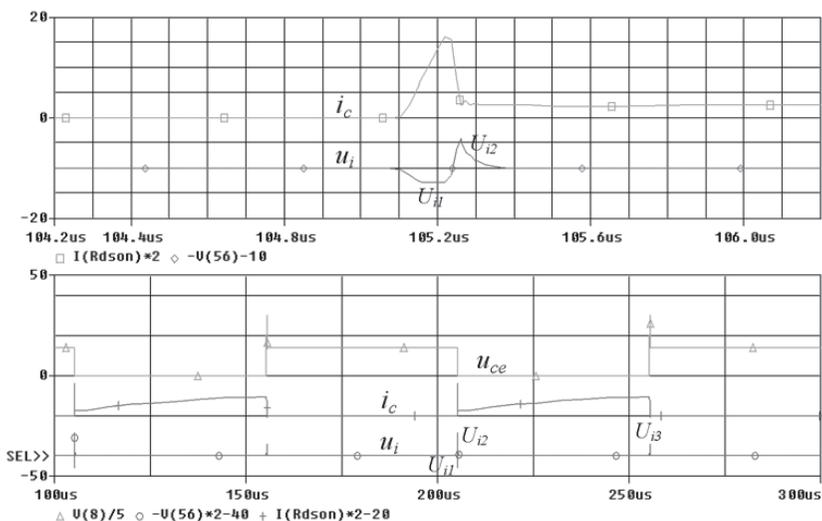
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 + L_2}} = 0,774 \quad (3.37)$$

Na základě vypočítaných hodnot teď můžeme vykonat simulační analýzu v programu PSPICE dle schéma uvedeného na obr. 3.6, kde motor je kvůli zjednodušení nahrazen R-L zátěží s parametry $R_Z = 11,66 \Omega$, $L_Z = 400 \text{ mH}$ tak, že je zohledněna i velikost jeho indukovaného napětí. Vyšetřovaný průběh proudu i_C tranzistoru se tak zjednodušením nezmění.

Výsledky získané simulací (napětí na tranzistoru u_{CE} , proud tranzistoru i_C a napětí $-u_i$ na odporu $R = 10 \Omega$) jsou uvedeny na obr. 3.7.



Obr. 3.6 Simulační schéma v programu PSPICE



Obr. 3.7 Výsledné průběhy získané simulací