

# SEZNAM

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Základní pojmy a veličiny</b> .....	<b>12</b>
1.1 Základní pojmy .....	12
1.2 Základní veličiny .....	12
1.3 Definice elektromagnetických polí.....	14
1.3.1 Elektrická pole .....	14
1.3.2 Magnetická pole .....	14
1.3.3 Elektromagnetická pole .....	15
1.3.4 Elektromagnetické vlnění .....	17
1.3.5 Neionizující záření.....	19
1.3.6 Ionizující záření .....	20
<b>2 EMC</b> .....	<b>21</b>
2.1 Členění EMC .....	22
2.2 EMC biologických systémů .....	23
2.3 EMC technických systémů .....	24
2.3.1 EMS - Elektromagnetická susceptibilita .....	25
2.3.2 EMI - Elektromagnetická interference .....	25
2.4 Způsoby přenosu elektromagnetické energie .....	27
2.5 Vazební mechanismy šíření rušivých signálů .....	29
2.5.1 Galvanická (impedanční) vazba .....	30
2.5.2 Kapacitní vazba .....	31
2.5.3 Induktivní vazba .....	31
2.5.4 Elektromagnetická vazba.....	32
2.5.5 Možnosti omezení vazeb .....	32
2.6 EMC frekvenčně řízených pohonů.....	33
2.6.1 Rušivé vlivy na výstupu měniče.....	34
2.6.2 Možnosti odstranění rušivých vlivů u frekvenčně řízených pohonů.....	36
2.6.3 Obecné zásady EMC pro instalaci frekvenčně řízených pohonů: .....	37
<b>3 Metody měření EMI</b> .....	<b>38</b>
3.1 Metody měření rušivých signálů v blízkém poli .....	38

3.2	Měření pomocí antén .....	40
3.3	Rozdělení elektromagnetického pole podle vzdálenosti od zdroje .....	43
3.3.1	Blízká reaktanční oblast pole.....	43
3.3.2	Blízká zářivá oblast pole - Fresnelova oblast .....	44
3.3.3	Vzdálená oblast - Fraunhoferova oblast .....	44
3.4	Měření v blízkém poli v rozmezí 100 kHz - GHz .....	46
<b>4</b>	<b>Analýza vlivu elektromagnetického pole na lidský organismus a hygienické normy.....</b>	<b>47</b>
4.1	Vliv elektromagnetických polí na lidský organismus .....	47
4.1.1	Statická elektrická pole.....	48
4.1.2	Statická magnetická pole .....	49
4.1.3	Elektromagnetická pole ELF .....	50
4.1.4	Elektrická a magnetická pole ELF.....	50
4.1.5	Vysokofrekvenční elektromagnetická pole .....	51
4.2	Hygienické normy .....	52
4.2.1	Vyhláška č.1/2008 Sb .....	53
	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>57</b>
<b>5</b>	<b>Měření EMI .....</b>	<b>58</b>
5.1	Měřicí technika .....	59
5.1.1	Měřič rušení.....	59
5.1.2	Snímač rušivých signálů.....	60
5.2	Měřené zařízení .....	62
5.3	Analýza měření EMI .....	65
5.3.1	Měření při nízkém výkonu .....	66
5.3.2	Měření při zvýšeném výkonu .....	69
5.3.3	Měření při maximálním výkonu .....	71
5.3.4	Měření napětíovou sondou.....	73
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>81</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>82</b>

## ÚVOD

V podstatě od doby, kdy lidstvo objevilo elektřinu a začalo jí využívat ve svůj prospěch, dochází k neustálému zvyšování počtu různých druhů elektrických a elektronických systémů a zařízení. Avšak tyto systémy při své činnosti vysílají a vyzařují do svého okolí elektromagnetickou energii. Tato energie je následně přijímána jinými elektrickými zařízeními a může způsobit jejich rušení. Rušením se dle EMC Směrnice 2004/108/ES rozumí nestandardní chování nebo úplné znemožnění činnosti daného zařízení. Tomuto typu rušení, způsobující růst úrovně rušení v kmitočtových pásmech od jednotek  $Hz$  až do stovek  $GHz$ , říkáme elektromagnetické rušení. V současné době vedle sebe existuje mnoho různých typů elektrických a elektronických systémů a zařízení pracujících na různých kmitočtech a pracujících na nejrůznějších úrovních výkonu od  $mW$  až po  $MW$ , kdy maximální poměr těchto výkonů může dosáhnout až  $200\text{ dB}$ , tj.  $10^{20}$ . Jednotlivá zařízení mohou obsahovat citlivé přijímače vyladěné na stejné nebo odlišné kmitočty, citlivé zesilovače či mikroprocesorové obvody. Tyto části zpracovávají často extrémně nízké úrovně výkonu řádově až  $10^{-14}\text{ W}$ . Pravděpodobnost vzájemného rušení, a tím možnost znemožnění nebo omezení funkce jednotlivých zařízení, je za těchto podmínek velká. Problémy s elektromagnetickým rušením stále více narůstají, zvláště pak v poslední době, kdy dochází k velkému rozvoji nových technologií, zejména sdělovací a telekomunikační techniky. Tyto nové technologie pracující na vysokých kmitočtech mohou být nejen zdroji rušení, ale jsou zároveň vůči elektromagnetickému rušení velice náchylné a aby došlo k jejich rušení, stačí menší hodnota přijímané energie, než je tomu u jiný nebo starších typů elektronických zařízení.

Další hodně diskutovaný problém související s vyzařováním a přijímáním elektromagnetické energie je vliv této energie, tj. vliv elektromagnetických polí na lidský organismus. Elektromagnetická pole mají účinek na člověka, jako ostatně na každé vodivé těleso. Zvláště pak pokud je člověk vystaven záření o vysokém výkonu po delší dobu. Bezpečné hodnoty elektromagnetického záření jsou stanoveny příslušnými hygienickými normami. V dnešní době, kdy činností člověka dochází ke zvyšování úrovně výskytu tzv. umělé elektromagnetické energie, se však stále více diskutuje otázka dlouhodobého vlivu nízkých hodnot elektromagnetické energie na

lidský organismus. Názory na tuto otázku, zda mají tyto účinky škodlivé následky na zdraví člověka, jsou nejednotné. Práce je rozdělena na teoretickou a praktická část.

**Cílem práce bylo provést:**

- Rozbor problematiky elektromagnetické kompatibility EMC zejména problematiku rušení EMI u výkonových prvků řízení pohonů a možný vliv tohoto rušení na sdělovací a telekomunikační systémy.
- Rozbor metod měření EMI v blízkém poli.
- Měření EMI - vyzařované elektromagnetické energie u zkoušeného zařízení v blízkém poli pro pásma 100 *kHz* do 1 *GHz*
- Rozbor měření EMI

# TEORETICKÁ ČÁST

# 1 Základní pojmy a veličiny

Nejprve je nutné definovat a vysvětlit některé základní pojmy a veličiny související a touto prací a oborem EMC.

## 1.1 Základní pojmy

Z důvodů používání některých pojmů v této práci je vhodné definovat příslušné pojmy dle EMC Směrnice 2004/108/ES [1]:

- a) „zařízením“ se rozumí přístroj nebo pevná instalace,
- b) „přístrojem“ se rozumí hotový přístroj nebo sestava přístrojů komerčně dostupná jako samostatný funkční celek určený pro konečného uživatele, který způsobuje elektromagnetické rušení nebo na jehož provoz může mít elektromagnetické rušení vliv,
- c) „pevnou instalací“ se rozumí určitá sestava několika druhů přístrojů, případně prostředků, jež jsou zkompletovány, instalovány a určeny k trvalému používání na předem daném místě,
- d) „elektromagnetickou kompatibilitou“ se rozumí schopnost zařízení uspokojivě fungovat v elektromagnetickém prostředí, aniž by samo způsobovalo nepřijatelné elektromagnetické rušení jiného zařízení v tomto prostředí,
- e) „elektromagnetickým rušením“ se rozumí elektromagnetický jev, který může zhoršit funkci zařízení. Elektromagnetickým rušením může být elektromagnetický šum, nežádoucí signál nebo změna v samotném prostředí šíření,
- f) „odolností“ se rozumí schopnost zařízení správně fungovat bez zhoršení kvality funkce za přítomnosti elektromagnetického rušení,
- g) „elektromagnetickým prostředím“ se rozumí veškeré elektromagnetické jevy pozorovatelné v daném místě.

## 1.2 Základní veličiny

V oblasti elektromagnetické kompatibility se používá několik druhů základních veličin, které nám umožňují stanovit velikost elektromagnetického rušení a elektromagnetické odolnosti u zkoušeného systému nebo zařízení. Samotné

metody a postupy měření elektromagnetického rušení jsou podrobně popsány ve 3. kapitole.

Základní veličiny popisující elektromagnetické rušení šířené po vedení jsou elektrické napětí  $U$  [V] a elektrický proud  $I$  [A]. U rušení šířeném vyzařováním, se používá intenzita elektrické pole  $E$  [ $V.m^{-1}$ ] a intenzita magnetické pole  $H$  [ $A.m^{-1}$ ]. Kromě těchto základních jednotek se používá jednotky výkonu  $P$  [W] a výkonová hustota  $S$  [ $W.m^{-2}$ ]. Číselná řada hodnoty těchto veličin může být velká. Např. elektrické pole může mít hodnotu v rozsahu od  $1 \mu V.m^{-1}$  do  $200 V.m^{-1}$ , což reprezentuje dynamický rozsah přes osm řádů ( $10^8$ ). Protože takto velké rozsahy jsou v problematice elektromagnetické kompatibility běžné, používají se i jiné jednotky, a to decibely [dB]. Decibely vyjadřují hodnotu poměru dvou veličin a mají tu vlastnost, že za pomoci logaritmů kompresují příliš široký rozsah poměru dvou veličin. Například napětí řady  $10^8$  je rovno 160 dB. Decibel byl původně vyvinutý v telefonním průmyslu k popisování účinků šumu v telefonním obvodu. Ucho má sklon logaritmicky, takže popisování šumu v dB je přirozené. Základní vzorce, sloužící pro přepočítání základních jednotek  $U$ ,  $I$ ,  $P$  na decibely jsou: [2]

$$dB = 10 \log \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (1.1)$$

$$db = 20 \log \left( \frac{U_2}{U_1} \right) \quad (1.2)$$

$$db = 20 \log \left( \frac{I_2}{I_1} \right) \quad (1.3)$$

V PŘÍLOZE č. 1 je uvedena tabulka převodu poměru jednotek  $U$ ,  $I$ ,  $P$  na dB. Kromě základní jednotky dB se používají odvozené, například dBmV, dBmA a dBmW, častěji používané jako dBm, jež jsou definované:

$$dBmV = 20 \log_{10} \left( \frac{V}{1mV} \right) \quad (1.4)$$

$$dBmA = 20 \log_{10} \left( \frac{A}{1mA} \right) \quad (1.5)$$

$$dBmW = dBm = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{1mW} \right) \quad (1.6)$$

## 1.3 Definice elektromagnetických polí

Anglický fyzik James Clerk Maxwell (1831-1879) je tvůrcem teorie elektromagnetického pole. Maxwell vyšel z poznatku, že měnící se magnetické pole je provázáno vznikem elektrického pole. Vyslovil předpoklad, že existuje také opačný jev: měnící se elektrické pole vytváří pole magnetické. To znamená, že děje, které vznikají při změnách pole elektrického nebo magnetického, jsou symetrické. Elektromagnetické pole je fyzikální pole, které odpovídá míře působení elektrické a magnetické síly v prostoru. Skládá se tedy ze dvou fyzikálně propojených polí, elektrického a magnetického. Setkáváme se s ním v běžném životě v řadě forem, ať již jako se světelným nebo tepelným zářením, nebo s vlnami v oblasti radiotechniky apod. [3]

### 1.3.1 Elektrická pole

Elektrická pole vznikají v důsledku působení elektrických nábojů  $Q$  [C], jejichž intenzita  $E$  se měří ve voltech na metr [ $V.m^{-1}$ ]. Hromadí-li se náboje na povrchu nějakého tělesa, mají tendenci se vzájemně přitahovat, resp. odpuzovat. Síla této tendence je charakterizována napětím  $U$  [V]. Čím vyšší je napětí, tím silnější se vytvoří pole. Vektory intenzity elektrického pole  $E$  popisují elektrické pole v každém bodu prostoru. Pole se nazývá elektrostatické, když se vektory ve všech bodech prostoru s časem nemění. Elektrické pole může existovat i bez toku elektrického proudu. Je-li např. zapojeno elektrické zařízení do síťové zásuvky, vytvoří se k němu přidružené elektrické pole (a to i v případě, že samotné zařízení není zapnuto), jehož velikost bude úměrná napětí připojeného zdroje. Intenzita elektrického pole je nejsilnější v bezprostřední blízkosti zařízení a klesá se zvětšující se vzdáleností od něj. Většina běžných stavebních materiálů jako dřevo nebo kov dokáže elektrická pole do značné míry odstínit.

### 1.3.2 Magnetická pole

Magnetická pole vznikají v důsledku pohybu elektrických nábojů, tj. toku elektrického proudu  $I$  [A]. Jejich intenzita  $H$  se měří v ampérech na metr [ $A.m^{-1}$ ], avšak obvykle se vyjadřuje pomocí magnetické indukce  $B$  [T]. Čím větší je elektrický proud, tím silnější je magnetické pole. Vektory indukce magnetického pole  $B$  popisují magnetické pole v každém bodu prostoru. Je-li elektrické zařízení zapnuto a protéká-li jím proud, vytvoří se k němu přidružené magnetické pole, jehož velikost bude



úměrná odebranému proudu z připojeného zdroje (elektrické pole však bude konstantní). Intenzita magnetického pole je největší v bezprostřední blízkosti zařízení a klesá se zvětšující se vzdáleností od něj. Tato pole snadno prostupují běžnými stavebními materiály, které je nedokážou odstínit.

### 1.3.3 Elektromagnetická pole

U vysokých frekvencí nad 30 kHz od sebe nelze odlišit elektrická a magnetická pole. Elektromagnetická pole jsou tvořena elektrickou a magnetickou složkou. Vztahy mezi těmito složkami jsou obecně popsány soustavou čtyř Maxwellových rovnic, jakýkoliv problém vychází z jejich řešení. V nízkofrekvenčním poli se uvádějí v integrálním tvaru, protože popisují celkový charakter pole. Při řešení problémů elektromagnetických vln se modifikují do diferenciálního tvaru, protože popisují lokální charakter pole. Z Maxwellových rovnic vyplývá, že elektromagnetická pole jsou vírové povahy, a mají tedy určitou energii, hybnost a setrvačnost [4].

#### a) První Maxwellova rovnice

Známa jako zákon celkového proudu, nebo jako zobecněný Ampérův zákon.

Rovnice v integrálním tvaru:

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \frac{d\psi}{dt}, \quad (1.7)$$

kde  $\psi \equiv \int_S D \cdot dS$  je tok indukce elektrického pole a  $I = \int_S j \cdot dS$  je celkový elektrický proud.

Cirkulace vektoru intenzity magnetického pole  $H$  po libovolně orientované uzavřené křivce  $c$  je rovna součtu celkového vodivého proudu  $I$  a posuvného proudu  $\frac{d\psi}{dt}$  ( $\psi$  je tok elektrického pole plochou  $S$ ), spřažený křivkou  $c$ . Křivka  $c$  a libovolná plocha  $S$ , jež křivku obepíná, jsou vzájemně orientovány pravotočivě.

Rovnice v diferenciálním tvaru:

$$\nabla \times \vec{H} = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1.8)$$

Nebo-li rotace vektoru intenzity magnetického pole  $H$  je rovna hustotě vodivého proudu  $j$  a hustotě posuvného (Maxwellova) proudu  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ .

## b) Druhá Maxwellova rovnice

Známá jako zákon elektromagnetické indukce, nebo jako Faradayův indukční zákon. Rovnice v integrální tvaru:

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.9)$$

kde  $\Phi \equiv \int_S B \cdot dS$  je magnetický indukční tok.

Cirkulace vektoru intenzity elektrického pole  $E$  po libovolně orientované uzavřené křivce  $c$  je rovna záporně vzaté časové derivaci magnetického indukčního toku spřaženého křivkou  $c$ . Křivka  $c$  a libovolná plocha  $S$ , jíž křivka obepíná, jsou vzájemně orientovány pravotočivě.

Rovnice v diferenciálním tvaru:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.10)$$

Nebo-li rotace vektoru intenzity elektrického pole  $E$  je rovna záporně vzaté derivaci magnetické indukce  $B$ .

## c) Třetí Maxwellova rovnice

Známá jako Gaussův zákon elektrostatiky.

Rovnice v integrální tvaru:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q, \quad (1.11)$$

kde  $Q = \int_V \rho dV$  je celkový volný elektrický náboj.

Elektrický tok libovolnou vně orientovanou plochou  $S$  je roven celkovému volnému náboji v prostorové oblasti  $V$  ohraničené plochou  $S$ .

Rovnice v diferenciálním tvaru:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.12)$$

Nebo-li divergence vektoru elektrické indukce  $D$  je rovna objemové hustotě volného náboje  $\rho$ . Ekvivalentní formulace: siločáry elektrické indukce začínají nebo končí tam, kde je přítomen elektrický náboj.

#### d) Čtvrtá Maxwellova rovnice

Známa jako zákon spojitosti indukčního toku, nebo jako Gaussova věta magnetismu

Rovnice v integrální tvaru:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (1.13)$$

Magnetický indukční tok libovolnou uzavřenou orientovanou plochou  $S$  je roven nule. Rovnice v diferenciálním tvaru:

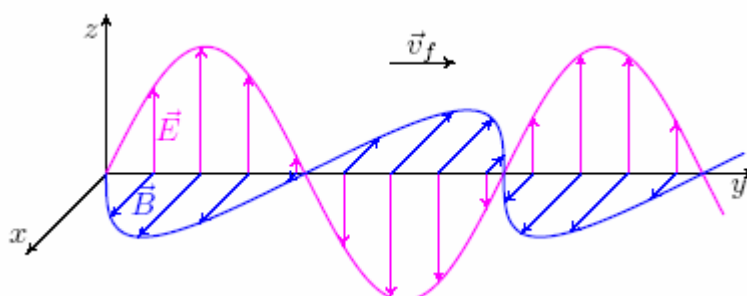
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.14)$$

Nebo-li divergence vektoru magnetické indukce  $B$  je rovna nule. Ekvivalentní formulace: Neexistují magnetické monopóly.

#### 1.3.4 Elektromagnetické vlnění

Deset let po Maxwellově smrti, německý fyzik Heinrich Rudolf Hertz experimentálně objevil elektromagnetické vlnění. Toto vlnění je procesem neustálých přeměn elektrického a magnetického pole, které se šíří rychlostí světla prostorem. Jedná se v podstatě o elektromagnetické pole, které se šíří prostorem ve vlnách rychlostí světla ( $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a elmag. vlny jsou samy o sobě vlastním přenašečem elektrické energie (nikoliv elektrický proud ani elektrické napětí, což jsou jen vnější projevy tohoto pole). Na obr.1.1 je elektromagnetická vlna zobrazena v jediném okamžiku. Elektromagnetické vlnění je vlnění příčné a má tyto vlastnosti:

- je spojeno s přenosem energie,
- vlnění zanikne přestane-li zdroj dodávat energii,
- přenos energie se v homogenním poli děje konstantní rychlostí.

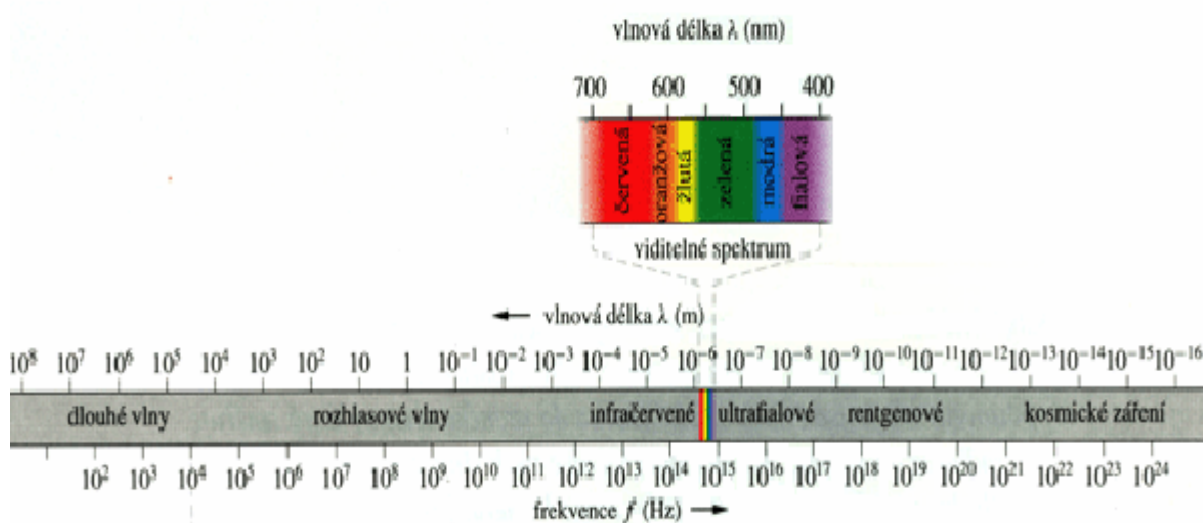


Obr.1.1 Elektromagnetická vlna v jediném okamžiku

Na elektromagnetické vlnění se dá pohlížet jako na vlnu, kterou charakterizuje rychlost šíření, vlnová délka a frekvence, jejichž vzájemný vztah je dán základním vzorcem:

$$c = \lambda \cdot f \quad (1.15)$$

Na obrázku 1.2 je základní rozdělení elektromagnetických vln podle vlnové délky (resp. frekvence). Hranice mezi jednotlivými typy nejsou ostré, volně přechází a mohou se i překrývat.



Obr.1.2 Spektrum elektromagnetických vln

Co se týká technického využití elektromagnetických vln, tak nejvýznamnější jsou zejména tyto typy vln [3]:

### a) Rádiové vlny

Jedná se o vlny nacházející se ve frekvenčním pásmu 3 kHz – 3 GHz. Mezi rádiové vlny patří extrémně dlouhé vlny (EDV) 3 Hz – 3 kHz, velmi dlouhé vlny (VDV) 3 – 30 kHz, dlouhé vlny (DV) 30 – 300 kHz, střední vlny (SV) 0,3 – 3 MHz, krátké vlny (KV) 3 – 30 MHz, velmi krátké vlny (VKV) 30 – 300 MHz, ultra krátké vlny (UKV) 0,3 – 3 GHz, super krátké vlny (SKV) 3 – 30 GHz a extrémně krátké vlny (EKV) 30 – 300 GHz. Rádiové vlny se používají např. v těchto aplikacích:

- radiomajáky,
- AM rozhlas na DV (155 kHz– 281 kHz), SV (520 kHz – 1720 kHz) a krátkých vlnách (3 MHz– 30 MHz),
- FM rozhlas na velmi krátkých vlnách (87,5 MHz – 108 MHz),

- první (118 MHz – 144 MHz) a druhé (225 MHz – 400 MHz) letecké komunikační pásmo,
- WLAN - WiFi (2,4 GHz – 2,4835 GHz) atd.

### **b) Mikrovlny**

Jedná se o vlny nacházející se ve frekvenčním pásmu 3 GHz – 300 GHz.

V tomto pásmu pracují např.:

- radiolokátory,
- mikrovlnné trouby,
- družicové pevné a pohyblivé služby,
- WLAN (5,15 – 5,82 GHz) atd.

### **c) Infračervené záření**

Jedná se o vlny ohraničené pásmem 300 GHz – 400 THz, využití zejména ve spec. vojenských aplikacích.

Dále následuje pásmo viditelného světla (400 – 790 THz), ultrafialového záření ( $10^{15}$  –  $10^{17}$  Hz), rentgenového záření ( $10^{17}$  –  $10^{20}$  Hz) a gama záření (nad  $10^{18}$  Hz). Jako každé vlnění se může elektromagnetické vlnění ohýbat, lámat, odrážet, interferovat či se polarizovat. Ohybu dochází na překážkách srovnatelných s vlnovou délkou, k odrazu na vodivých plochách (toho se využívá v radarech a u televizních antén). Polarizované vlnění je takové, kde se kmity dějí v jedné rovině. Elektromagnetické vlnění můžeme polarizovat natočením dipólu [26].

#### **1.3.5 Neionizující záření**

Vlnová délka a frekvence charakterizují další důležitou vlastnost elektromagnetických polí, kterou jsou tzv. kvanta. Kvanta polí s vyšší frekvencí (kratší vlnová délka) nesou větší energický potenciál než pole s nižší frekvencí (delší vlnová délka). Elektromagnetická vlnění, jejichž kvanta vykazují energetickou nedostatečnost pro rozbití chemické molekulární vazby, jsou označována jako neionizující záření. Patří sem např. umělé zdroje elektromagnetických polí (elektřina, mikrovlny a vysokofrekvenční pole), které se nacházejí relativně na konci elektromagnetického spektra dlouhých vlnových délek a nízkých frekvencí. Jejich kvanta nejsou schopna se vyvázat z chemické molekulární vazby.

### **1.3.6 Ionizující záření**

Některé elektromagnetické vlny nesou však taková množství kvantové energie, že u nich dochází k rozbití chemické molekulární vazby. Tato elektromagnetická vlnění, kam patří např. záření gama, kosmické nebo rentgenové záření, jsou označována jako ionizující záření.

## 2 EMC

S prudkým rozvojem elektroniky, zejména mikroprocesorové a komunikační techniky v posledních desetiletích a jejím pronikáním do všech oblastí každodenního života obor elektromagnetická kompatibilita (Electromagnetic Compatibility EMC).

EMC nebo-li slučitelnost, jež je definována jako schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí zdroje (přírodní či umělé) rušivých elektromagnetických signálů, a naopak svou vlastní činností nepřipustně neovlivňovat své okolí, tj. nevyzařovat signály, jež by mohly být pro své okolí rušivé [5], [6].

Technické zařízení a systémy (technické i biologické), musí být odolné vůči rušení působící od jiných zařízení a nesmí přitom samy nepříznivě ovlivňovat funkci jiných zařízení a systémů. Obecně platí, že systém nebo zařízení může být jak zdrojem rušení, tak i jeho příjemcem. Důležitost zkoumání EMC u jednotlivých systémů asi nejvíce vystihuje výrok H. M. Schlikeho, jednoho ze zakladatelů elektromagnetické kompatibility jako samostatného oboru z roku 1968, který řekl: *"Systém sám o sobě může být dokonale spolehlivý - bude však prakticky bezcenný v provozu, pokud současně nebude elektromagneticky kompatibilní. Spolehlivost a elektromagnetická kompatibilita jsou neoddělitelné požadavky na systém, který má fungovat v každé době a za všech okolností"*.

Jak již bylo naznačeno, systém je elektromagneticky kompatibilní se svým okolím pokud:

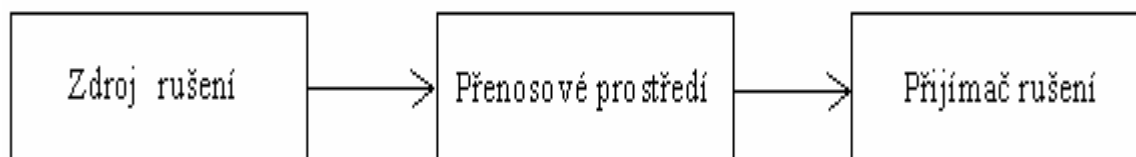
- nezpůsobuje rušení ostatních systémů,
- není náchylný na rušení od okolních systémů,
- nezpůsobuje rušení sám sobě.

Splnění podmínek EMC pro daný objekt, je nejen výhodné vzhledem k jeho funkčnosti, ale je to i nutné k tomu, aby mohl být prodejný ve většině zemích světa, která splnění těchto kritérií vyžadují. Jednotlivé státy vydávají nařízení sloužící k omezení vysílání a příjmu rušivého elektromagnetického záření pro jednotlivé elektronické systémy a zařízení. Záměrem je snaha o omezení elektromagnetického znečištění prostředí tzv. elektrosmogu a omezení nebo úplné odstranění výskytu případů elektromagnetického rušení. Většinu světového trhu představuje Evropský hospodářský prostor EEA (European Economic Area), který zahrnuje 27 členů

Evropské unie a také čtyři členy Evropské sdružení volného obchodu EFTA (European Free Trade Association). Evropský předpis 2004/108/EC přijatý 20. července 2007 členy EEA, stanovuje požadavky na elektronická zařízení z hlediska EMC. Tato směrnice např. říká, že členské státy přijmou veškerá vhodná opatření, aby se na trh nebo do provozu uvádělo pouze zařízení, které je-li řádně instalováno, udržováno a používáno k danému účelu, splňuje požadavky této směrnice. Zároveň také říká, že členské státy nesmějí na svém území z důvodů týkajících se EMC bránit uvádění zařízení na trh nebo do provozu, pokud tato zařízení splňují požadavky této směrnice. Pokud daný produkt splňuje požadavky tohoto předpisu, výrobce nebo dovozce připojí „CE“ značku k produktu, což značí že produkt je legálně prodejný ve státech EEA s ohledem na směrnice EMC. Tyto základní požadavky jsou uvedeny v PŘÍLOZE č.2. Mezi nejvíce užívaný standart je CISPR 22, který stanovuje hodnoty elektromagnetických emisí u informačních systému. Obdobou komise CISPR zahrnující evropské státy, je FCC (Federal Communications Commission) pro USA [7], [8].

## 2.1 Členění EMC

Hlavní oblastí již se EMC zabývá je vznik, přenos a příjem elektromagnetické energie. Tyto tři aspekty tvoří základní rámec EMC, jak je zobrazeno na obr.2.1, kde zdroj (vysílač) rušení vysílá elektromagnetickou energii, která je přenesena k příjemci (přijímači) rušení přes přenosové prostředí. Tato energie pak způsobuje v přijímači buď požadovanou nebo nežádoucí činnost, přičemž nežádoucí činnost vznikne přijetím nežádoucí (cizí) elektromagnetické energie, způsobující v přijímači rušení.



Obr.2.1 Základní řetězec EMC

Jak zobrazuje obr.2.1, první složkou základního řetězce EMC reprezentuje zdroj rušení. Tato část řetězce zahrnuje zkoumání otázek místa a principu vzniku elektromagnetického rušení, jeho charakter a intenzitu. Podle způsobu vzniku rozdělujeme zdroje elektromagnetických polí na zdroje **přirozené** a **umělé**. Mezi přirozené zdroje patří hlavně elektrické výboje v ovzduší, prudké změny zemského



magnetického i elektrického pole (elektromagnetické bouře, polární záře apod.) a elektromagnetická vlnění produkovaná kosmickými tělesy. Umělé zdroje rušení, jsou zdroje vytvořené lidskou činností („man made noise“), k nimž patří nejrůznější technická elektrická a elektronická zařízení, jako jsou elektrické motory, spínací relé, proces přenosu a distribuce elektrické energie, elektronické sdělovací zařízení, tepelné a světelné spotřebiče apod. [7]. Podle dalšího kritéria můžeme rušivé signály rozdělit na **funkční** a **nefunkční**. Funkční zdroje nazýváme takové zdroje jež jsou základem funkce jednoho systému (např. sdělovací signály vysílačů) a přitom mohou ovlivnit základní funkce jiného systému a být tedy vůči němu rušivé. Nefunkční zdroje jsou ostatní zdroje, které při svém provozu produkují parazitní (nežádoucí) rušivá napětí či pole [8].

Druhá část řetězce se zabývá elektromagnetickým přenosovým prostředím a cestami, tj. vazbami kterými je energie přenesena od zdroje k přijímači rušení.

Třetí část řetězce, reprezentovaná na obr. 2.1 přijímačem rušení, se zabývá klasifikací možných typů přijímačů a podrobnou specifikací rušivých účinků na základě analýzy konstrukčních a technologických parametrů potenciálního přijímače, a následně z těchto závěrů stanovuje plynoucí hodnotu jeho elektromagnetické odolnosti [5], [6].

Kromě těchto základních úkolů se EMC zabývá také postupy pro měření elektromagnetického rušení a elektromagnetické odolnosti, definováním jednotlivých typů rušení a definováním specifických norem, které musejí zkoušené objekty splňovat, aby byly uznány elektromagneticky kompatibilní. Zabývá se také vhodnými konstrukčními návrhy systémů s cílem minimalizování vlivů rušení způsobené jejich vysíláním nebo přijímáním. Obor EMC má tedy mnoho oblastí své působnosti, a lze ji rozdělit do dvou hlavních oblastí na:

- elektromagnetickou kompatibilitu biologických systémů,
- elektromagnetickou kompatibilitu technických systémů.

## **2.2 EMC biologických systémů**

Jak lze odvodit z názvu, EMC biologických systémů se zabývá hodnotami a vlivem elektromagnetických signálů na živé organismy a životní prostředí. Problematikou EMC biologických systémů se zabývají výzkumná lékařská pracoviště, s cílem posoudit odolnost lidského organismu vůči elektromagnetickým vlivům,

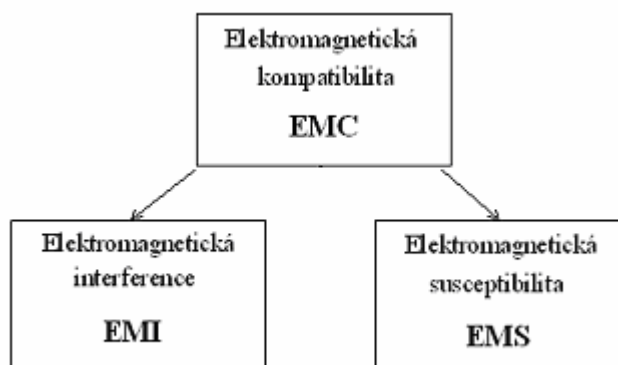
mechanismy jejich působení apod. Určit vliv a účinky elektromagnetických signálů na živé organismy je velmi problematické, jelikož každý organismus reaguje na tyto signály rozdílně. Závisí to zejména na době vystavení vlivu těmto signálům a na vlastnostech daného organismu. Jelikož je každý člověk jiný, jsou účinky a vliv elektromagnetického pole, a tím i reakce lidského organismu dosti individuální. Z tohoto důvodu se zatím nepodařilo dojít k obecné schodě a k obecně platným závěrům, vycházejících z dosavadních výzkumů. Každý stát vydává své vyhlášky a nařízení, stanovující hodnoty přípustných dávek elektromagnetického záření na osobu. I přes snahu o jejich sjednocení, se i v Evropské unii nacházejí u některých členských států rozdíly v těchto hodnotách [5], [6].

V České republice tuto problematikou řeší nově vydané nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, vydané dne 9.1.2008 a nabývající účinnosti od 30. dubna 2008., nahrazující předešlou Vyhlášku ministerstva zdravotnictví č. 80/2000 Sb. Tato nová vyhláška stanovuje mimo jiné i nejvyšší přípustné hodnoty expozice neionizujícím zářením pro zaměstnance a ostatní osoby, způsob jejího zjišťování a hodnocení a hodnocení rizika neionizujícího záření ve frekvenční oblasti od 0 Hz do  $3 \cdot 10^{11}$  Hz. Bezpečné hodnoty stanovené touto vyhláškou a všeobecně vliv elektromagnetického pole na lidské zdraví, jsou podrobně popsány v 5. kapitole [9].

### **2.3 EMC technických systémů**

Tato druhá základní oblast se zabývá činností a symbiózou různých druhů elektrotechnických, elektronických systémů a zařízení a jejich možného vzájemného nežádoucího ovlivňování, vzniklého při jejich běžné činnosti. Každý systém či zařízení, nebo jeho část, může být současně jak vysílačem, tak i přijímačem elektromagnetického rušení. V praxi lze většinou jako zdroj rušení označit to zařízení, které je méně citlivé na rušení a zároveň generuje větší úroveň rušení než samo přijímá. V průmyslové oblasti jako typické zdroje rušení můžeme označit např. řízené polovodičové měniče velkých výkonů, generátory, transformátory, jističe, stykače, mechanické relé atd. Zařízení s menší úrovní generovaného rušení a s větší citlivostí na rušení, lze naopak označit jako přijímač rušení. Mezi typické přijímače rušení patří rádiové, televizní a telefonní přijímače, výpočetní technika, systémy přenosu dat nebo měřící přístroje [5], [6].

Podle hlavních činností, kterými se EMC technických systémů zabývá, můžeme EMC rozdělit do dvou základních oblastí, jak je naznačeno na obr. 2.2.



Obr.2.2 Základní oblasti EMC

### 2.3.1 EMS - Elektromagnetická susceptibilita

Elektromagnetická citlivost či odolnost vůči rušení EMS (Electromagnetic Susceptibility), představuje schopnost zařízení či systému odolávat rušícím signálům a pracovat bezporuchově nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v prostředí. EMS se tedy zabývá především technickými opatřeními, které zvyšují u přijímače rušení jeho elektromagnetickou odolnost proti vlivu rušivých signálů, tedy odstraňováním důsledků rušení. K testování odolnosti zařízení vůči rušení se používají EMC simulátory. Testování se provádí během vývoje nebo přímo na zkonstruovaných zařízeních a jedná se o praktické ověření stupně kompatibility daného zařízení.

### 2.3.2 EMI - Elektromagnetická interference

Elektromagnetické rušení EMI (Electromagnetic Interference) je proces, při kterém se energie, produkovaná zdrojem, přenáší prostřednictvím parazitní vazby do jiných systémů, kde působí rušivě. Oblast EMI se tedy zabývá především identifikací zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů a identifikací parazitních přenosových cest. Zahrnuje měřicí metody a postupy pro kvantitativní hodnocení vybraných parametrů. Problematika měření, která je pro závěrečné posouzení EMC daného zařízení vždy rozhodující, je navíc komplikovaná tím, že i samotné měřicí zařízení mohou být zdrojem a současně i přijímačem rušivých signálů, s čímž je nutno při měření počítat. Kompatibility celého systému se dosahuje technickým opatřením především na straně zdrojů rušení a jejich přenosových cest. EMI se tak zabývá hlavně příčinami rušení a jejich odstraňováním.

Pro názornost uvádím několik skutečných případů EMI, které se v minulosti staly a byly popsány [10]:

- V polovině 70. let vyvinula automobilka Volkswagen počítačem řízený systém vstřikování paliva. V Evropě fungoval spolehlivě, zatímco v Severní Americe se u tomto systému často objevovaly různé závady. Důvodem bylo použití zesilovačů u amatérských radiostanic, které interferovaly s řídicí jednotkou vstřikovače.
- V roce 1983 došlo k havárii v hutích na východním pobřeží v USA. Příčinou havárie bylo rušení ruční vysokofrekvenční vysílačkou mikroprocesorového systému řízení pracujícího jeřábu. Došlo k předčasnému převrnutí licí pánve s rozžhaveným kovem, který následně zabil jednoho dělníka a vážně zranil další čtyři.
- 17. června 1996 se nedaleko pobřeží USA zřítilo do oceánu dopravní letadlo s 230 cestujícími na palubě. Následným vyšetřováním se zjistilo, že příčinou výbuchu byl elektrostatický výboj v palivové nádrži letadla. Vlivem nešťastné shody okolností, především použitím klimatizace po dobu dvou hodin stání letadla na letišti, které způsobilo zvýšení teploty v palivových nádržích, a tím zvýšený vznik výbušných par a náhodného elektrostatického výboje na jedné z neuzemněných částí centrální palivové nádrže na křídle, došlo k výbuchu a zničení letadla. Nepřežilo všech 230 cestujících.

Případy EMI v ČR [10]:

- Impulsní rušení v nemocnici v Praze na jednotce intenzivní péče, kdy měla souprava kardiokopu neustále monitorovat dech, tep a teplotu připojených pacientů. Avšak spínání okolních výkonových spotřebičů vyvolávalo v kardiokopu přídavné pulsy, které se vyhodnocovaly jako nesynchronní tep srdce. Navíc vadný startér zářivkového svítidla poblíž jednotky, který spínal každou sekundu, vyvolával trvale hlášení překročení meze tepů a blokoval měření. Celá věc skončila tím, že souprava vzhledem k její naprosté neodolnosti vůči rušení musela být vyměněna za systém od jiného výrobce.
- Ztráta rádiového spojení mezi vysílači a přijímači na lodích (remorkérech) Labské plavby a v dolech na Ostravsku. Zde docházelo k velmi intenzivnímu rušení, které naprosto znemožňovalo příjem a vysílání. Kromě toho, v dolech narušilo i funkci automatického havarijního vypínání kombajnu. Zdrojem

rušení v dolech byl tyristorový měnič (střídač), který je částí pohonu kombajnu, a na lodích mikroprocesorový řídicí systém obsahující tranzistorové výkonové napáječe.

- Rušení elektrokardiografu. V poliklinice ve středu Prahy ručička zapisovače EKG občas dostávala tak silné škubání, že to zcela znemožňovalo natočení záznamu EKG. Po zatlumení přístroje odrušovacími prostředky byl natočen záznam morseovky. Z volací značky se ukázalo, že je to krátkovlnné vysílání ministerstva dopravy, které mělo anténu 150 m od polikliniky. Nerušený záznam byl dosažen až po kompletním odstínění místnosti EKG a použití jiného elektrokardiografu, odolného proti všem rušením.

## 2.4 Způsoby přenosu elektromagnetické energie

Typický elektronický systém se obvykle sestává z jednoho nebo více podsystémů (zařízení), které komunikují mezi sebou prostřednictvím kabelů. Napájení pro jednotlivé subsystémy je obvykle z veřejné střídavé sítě 230 V / 50 Hz, které je přes usměrňovače usměrněno na požadované stejnosměrné napětí, pro napájení jednotlivých vnitřních elektronických komponentů systému. Napájecí vedení však umožňuje kromě své hlavní funkce i přenos nežádoucí elektromagnetické energie vysílané ostatními systémy. Tato energie přijímaná napájecím vedením daným systémem, může způsobit v daném systému rušení. Rušivé signály mohou také projít do systému přes kabely, jimiž jsou jednotlivé podsystémy propojeny, sloužících pro přenos řídicích dat. Zároveň platí, že delší kabel, tím větší elektromagnetickou energii může kabel vysílat i přijímat. Další možnost přenosu elektromagnetické energie je přes stínění, kdy jednotlivé části systému jsou uloženy pod kovovými kryty a na těchto krytech se mohou indukovat proudy, které pak mohou vyzařovat do vnějšího prostředí. Často se stává, zejména u levných systémů, že jednotlivé podsystémy jsou uzavřeny v nekovových krytech, většinou v umělohmotných. Elektronické obvody uzavřené v těchto umělohmotných krytech, jsou z velké části vystaveny elektromagnetickému záření a jsou vůči němu méně odolné a současně špatně brání vysílání potenciálně rušivých signálů. [7]

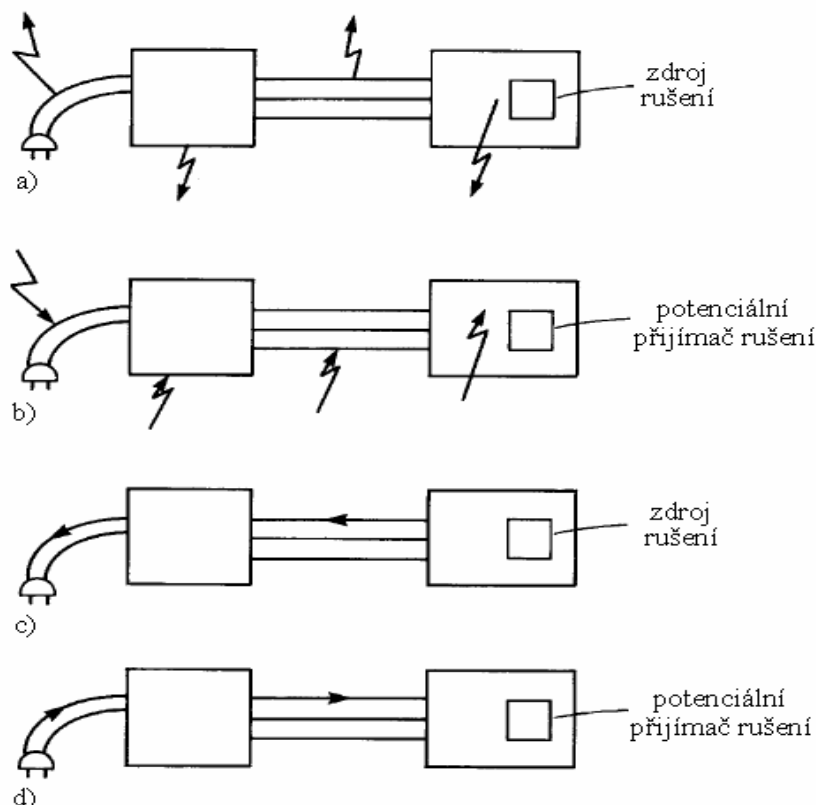
Na obr.2.3 jsou zobrazeny nejčastější způsoby šíření a přijímání elektromagnetických signálů, jedná se o:

- signály šířené a přijímané vyzařováním (elektromagnetická vazba),

- signály šířené a přijímané po vedení (galvanická, kapacitní nebo induktivní vazba)

Jak je zobrazeno na obr.2.3a, elektromagnetické energie může vyzařovat z napájecích kabelů, z kovových krytů jednotlivých podsystémů a jejich kabelového propojení nebo z elektronických součástí umístěných pod nekovovým krytem. Důležité je si uvědomit, že v napájecím kabelu pro signály o frekvenci 50 Hz

, se nacházejí mimo jiné i signály o různých frekvencích. Pokud je kabel delší (1 m a více), bude tento kabel nejen velice dobře vyzařovat, ale může též dobře fungovat jako anténa a přijímat vyzařovanou energii ze svého okolí, jak je naznačeno na obr.2.3b. Tyto indukované signály, existujících jak v napájecím vedení tak ve spojovacích kabelech, se pak dostanou do vnitřních komponentů systému, kde mohou způsobit rušení. Nežádoucí signály mohou být tedy vyzařovány nebo přijímány síťovým kabelem, vzájemnými propojovacími kabely, kovovými kryty nebo vnitřními obvody podsystémů, třebaže tyto části nejsou určeny pro vedení signálů. [7]



obr.2.3 Způsoby šíření elektromagnetické energie: a) šíření vyzařováním, b) přijímání vyzařované energie, c) šíření po vedení, d) přijímání po vedení

K elektromagnetickému rušení nemusí dojít pouze šířením elektromagnetických vln vzduchem, ale také přes kovové vodiče jak je naznačeno na obr.2.3c,d. Obvykle

je tato cesta šíření nežádoucí energie mnohem účinnější, než je cesta vzduchem. Z tohoto důvodu se používají v daném systému filtry, které přenosu pomocí této cesty (vazby) brání. Problém přenosu potenciální rušící energie, často přesáhne hranice ukázané na obr.2.3. Např. rušení šířící se pomocí síťového kabelu, který je připojen k veřejné síti, se pak může po veřejné síti dále šířit až na velké vzdálenosti.

Lze tedy říci že, jednotlivá zařízení určitého elektronického systému, nebo systém samotný, jsou propojeny se svým okolím přes různá rozhraní, jako jsou např. vzdušný prostor, spojovací kabely, napájecí vedení, stínění, zemnění, či datové a signálové vodiče. Přes tato rozhraní však mohou být kromě žádaných signálů přeneseny na zařízení i nežádoucí signály, které pak svým působením na přijímač způsobit jeho rušení [7], [11].

Mezi základní vazby, které slouží k přenosu potenciální rušící energie jsou:

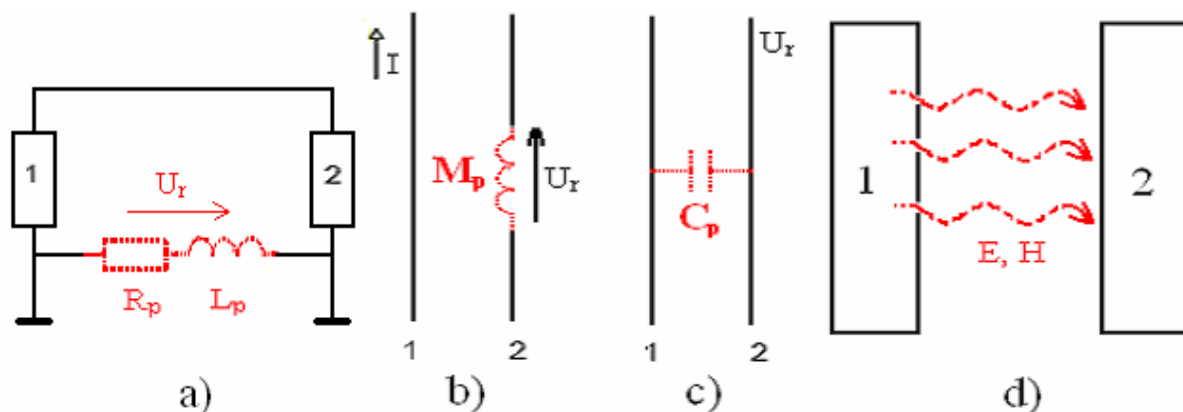
- galvanická vazba,
- kapacitní vazba,
- induktivní vazba,
- elektromagnetická vazba.

## **2.5 Vazební mechanismy šíření rušivých signálů**

Přenos možných rušivých signálů ze zdroje k přijímači rušení závisí na elektromagnetickém vazebním prostředí, tj. na typu vazby. Rozlišujeme čtyři základní druhy vazeb:

- galvanická vazba,
- kapacitní vazba,
- induktivní vazba
- vazba vyzařováním (vazba elektromagnetickým polem).

Základní principy působení jednotlivých vazeb, mezi dvěma vodiči či systémy 1 a 2, jsou schematicky naznačeny na obr.2.4 [5], [6].



Obr.2.4 Druhy elektromagnetických vazeb: a) galvanická, b) induktivní, c) kapacitní, d) elektromagnetická

### 2.5.1 Galvanická (impedanční) vazba

Galvanická vazba nebo-li vazba společnou impedancí, je vazbou dvou elektrických systémů či bloků, jejichž proudové smyčky se uzavírají společnými úseky spojovacích vedení, tedy přes společnou impedanci. Tato společná impedance, má nejčastěji charakter sériového obvodu RL a může být tvořena např. vnitřní impedancí společného napájecího zdroje, společného přívodu řídicích obvodů nebo být impedancí společného zemnicího systému. Tato vazba se vyskytuje, když různé obvody používají společné vodiče a/nebo vazební impedance. Průtokem proudu, který je zdrojem rušení (např. impulsy ze střídačového zdroje, z hodinového oscilátoru, apod.), vzniká na odporu a při vyšších kmitočtech i na indukčnosti vodiče parazitní napětí  $U_r$ , které se tak dostává do rušeného obvodu, má-li tento obvod s rušícím obvodem část společného vedení.

Jako typický případ galvanické vazby je vazba tzv. zemnicí smyčkou. Je to vazba dvou systémů či zařízení, která vzniká v případě jejich samostatného zemnění ve dvou různých bodech. Následným vlivem bludných zemnicích proudů vzniká mezi těmito body nahodilé zemní rušivé napětí.

Zabránit vzniku a případně omezit galvanické vazby, lze několika způsoby:

- zvětšením celkové impedance zemnicí smyčky a zvětšením jejího útlumu případně el. rozpojení,
- u signálových vodičů neslučovat společný vodič,
- nevytvářet společné části napájecích přívodů k jednotlivým blokům,
- vzájemně galvanicky oddělit např. funkčně související signálové a výkonové obvody jednoho zařízení.



### 2.5.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazby jsou způsobeny parazitními kapacitami mezi vodiči vedenými blízko sebe, hlavně pak mezi vodiči vedenými ve větší délce paralelně, např. ve svazcích vodičů, v kabelech nebo na deskách plošných spojů. Parazitní kapacitou modelujeme elektrické pole, které existuje mezi každými dvěma vodiči (vodivými částmi) s různým potenciálem. V technické praxi existuje velké množství různých variant parazitních kapacitních vazeb mezi různými typy obvodů, nejčastější jsou:

- kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů,
- kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem - je častým případem parazitní vazby v analogových a číslicových obvodech,
- kapacitní vazba vůči zemi - vyvolaná velkou kapacitou např. přívodů obvodu vůči společné zemi.

Kapacitní vazby lze odstranit například :

- zkroucení párů rušících i rušených vodičů,
- užitím stíněných vodičů,
- vzájemně elektricky odstínit oba ovlivňující se vodiče buď stíněním vodiče, nebo zavedením pomocného „stínícího“ spoje s nulovým potenciálem.

### 2.5.3 Induktivní vazba

Prochází-li obvodem elektrický rušivý proud, vzniká v okolním prostoru konstantní nebo proměnné magnetické pole, v závislosti na časovém průběhu proudu. Ve vodičích, které jsou v časově proměnném magnetickém poli, se indukuje rušivé napětí, jehož velikost roste se zvyšováním kmitočtu, nebo s rostoucí rychlostí časových změn proudu v primárním obvodu. Parazitní induktivní vazba je nebezpečná zejména v případech rychlých změn primárního, tj. rušivého proudu o velké velikosti. Tyto situace nastávají typicky při elektrostatických výbojích, ať již přírodních (blesk), či umělých lokálních výbojích. Induktivní vazba však také vzniká, když přijímací smyčkou prochází rozptylové magnetické pole transformátoru nebo tlumivky. Pro minimalizaci parazitní induktivní vazby mezi obvody je třeba, aby:

- délka souběžně probíhajících vodičů obou obvodů byla minimální,
- vzdálenost obou obvodů byla co největší,
- velikost proudové smyčky rušeného obvodu byla co nejmenší.

Dodatečné možnosti omezení vazby:

- omezení induktivní vazby pomocí závitů nakrátko,
- kompenzace induktivní vazby zkroucením vodičů obvodu přijímače,
- minimalizace vazby kolmým natočením vazebních smyček,
- minimalizace vazby stíněním obvodu přijímače.

#### **2.5.4 Elektromagnetická vazba**

Elektromagnetická vazba je typická pro přenos rušivých signálů mezi prostorově oddělenými zařízeními. Při větších vzdálenostech mezi zdrojem a přijímačem rušení, kdy je prakticky vyloučena kapacitní i induktivní vazba, je možná vzájemná vazba obou objektů vyzářeným elektromagnetickým polem. K parazitním vazbám vyzařováním lze typicky počítat rušení blízkými vysílači, atmosférická rušení i řadu druhů průmyslových poruch. Tento druh rušení se projevuje v rádiových přijímačích, do nichž se dostává anténou, příp. jejím svodem, což je charakteristické pro rušení vyzařováním. Působením elektromagnetické vlny se ve vodičích přijímače indukuje rušivé napětí, které se v jeho obvodech sečítá s užitečným signálovým napětím nebo jej dokonce zcela překryje. Ochranu proti elektromagnetickému rušení vyzařováním lze realizovat pomocí stínicího krytu či přepážky umístěné mezi zdrojem a přijímačem rušení, čímž dojde vlivem absorpce a odrazu k zeslabení zdrojem vyzářené elektrické energie, dopadnuté na přijímač.

#### **2.5.5 Možnosti omezení vazeb**

Je velmi těžké určit, zda daný signál opravdu způsobí na přijímači rušení. Neúmyslné generování nebo příjem elektromagnetické energie, tudíž nemusí být vždy nutně škodlivé. Obecně platí, že rušení nastane tehdy, když přijatá energie signálu je dostatečně velká a způsobí, že se přijímač začne chovat nežádoucím způsobem. To závisí zejména na způsobu zpracování přijímané energie přijímačem a její samotný vliv na přijímač, související s jeho elektromagnetickou odolností. Tento signál pak můžeme označit jako signál rušící. Pokud k rušení určitého systému dojde, je pak toto rušení nutné omezit nebo úplně odstranit. Existují tři způsoby jak omezit rušení:

- potlačení vzniku a šíření rušení v samotném zdroji,
- omezením přenosových vazeb,
- zvýšením odolnosti přijímače vůči rušení.

První a nejučinnější místo, kde můžeme začít s omezováním rušení, je potlačení vyzařování už ve zdroji, například uložením vysílače do stíněné klece. Snížení citlivosti přijímače a zároveň uchovat požadovanou funkci zařízení je obtížné. Lze to například realizovat zavedením samoopravných kódů v přijímači, které umožní správnou funkci přijímače. Důležité je také, aby cena, o kterou se navýší výsledné zařízení splňující EMC normy, byla co nejnižší.

Nikdy se nejedná o působení jediného zdroje rušení na jediný přijímač, ale vždy se jedná o vzájemné a všestranné ovlivňování více systémů a zařízení. Pokud chceme určit míru EMC jednotlivého systému, tak nejdříve tento systém považujeme za zdroj rušení, a všechny ostatní systémy za přijímače, a hodnotíme jeho vliv na okolní systémy. Naopak poté tento systém považujeme za ovlivňovaný a hodnotíme důsledky jeho možných ovlivnění od všech ostatních systémů [12].

## **2.6 EMC frekvenčně řízených pohonů**

Jedná se zejména o problematiku rušivých signálů generovaných měniči frekvence s napěťovým meziobvodem a šířkově pulsní modulací (PWM) pro střídavé pohony z pohledu běžné průmyslové praxe. Jak již bylo zmíněno současná situace v oblasti využití elektrické energie je charakteristická rychlým nárůstem počtu aplikací, kde se uplatňují výkonové spínací tranzistory pracující s vysokými spínacími frekvencemi, s vysokými strmými napětí a proudy a často také s velkými výkony. Tento stav však s sebou nese velké množství různorodých problémů, které souvisejí s rušivými účinky, jež negativně ovlivňují funkci okolních zařízení i zařízení samotného. Velmi aktuální je tento problém v oblasti měničů frekvence pro střídavé elektrické pohony, kde se uplatňuje PWM modulace často při značných výkonech [13].

Pohon s asynchronním motorem napájeným z měniče frekvence se v průmyslových aplikacích stal standardem. Co se týče servopohonů, měnič frekvence nejčastěji napájí synchronní motory s permanentními magnety (PMSM). Výkonová část měniče je v obou skupinách pohonů stejná. Nejstandardnější provedení měniče frekvence pro průmyslové pohony lze charakterizovat těmito znaky:

- vstupní usměrňovač je nejčastěji realizován třífázovým (v případě malých výkonů někdy i jednofázovým) diodovým můstkem,

- výstupní napětí usměrňovače je vyhlazeno kondenzátorem,
- v případě potřeby generátorického brzdění pohonu je ke stejnosměrnému obvodu připojena brzdná jednotka s rezistorem,
- výstupní střídač s prvky IGBT,
- výstupní napětí střídače je formováno šířkově pulsní modulací s frekvencí nejčastěji v rozsahu od 1 do 20 kHz.

Rušivé vlivy těchto měničů frekvence je možné rozčlenit do těchto skupin:

- Rušivé vlivy na napájecí síť – měnič frekvence odebírá nesinusový proud, pracuje se špatným činitelem výkonu  $I = P/S$  (obdoba účinníku  $\cos \varphi$ , avšak se zohledněním vyšších harmonických) a zatěžuje síť vyššími harmonickými, spektrum harmonických  $i$  / se mohou rychle měnit.
- Rušivé vlivy na výstupu měniče – nepříznivé vlivy na motor, zejména vyšší napěťové namáhání motoru, větší hluk, přídavné tepelné ztráty, větší zvlnění momentu a případný negativní vliv na okolní elektrické zařízení.
- Vysokofrekvenční elektromagnetické rušení – sleduje se zejména pásmo 150 kHz – 30 MHz; uplatňuje se na vstupu i výstupu měniče a může rušit hromadné dálkové ovládání (HDO), zabezpečovací systémy, rádiový a televizní přenos, řídicí a měřicí systémy atd.

## 2.6.1 Rušivé vlivy na výstupu měniče

### **Napěťové a proudové špičky na výstupu měniče**

Spínací doba prvků IGBT ve střídači, který pracuje se PWM, se pohybuje v intervalu od 0,1 do 1  $\mu\text{s}$ . Tomu odpovídá strmost změny napětí až  $5\,000\text{ V}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ . U některých měničů je spínací doba záměrně prodlužována konstrukcí budiče IGBT, avšak nárůst této doby je limitován velikostí spínacích ztrát polovodičového prvku. Při velkých strmostech se již mohou začít výrazně projevat parazitní vlivy způsobené rezistory, kapacitami, indukčnostmi a svody kabelu mezi motorem a měničem. Po přivedení napětí na kabel se začne kabelem šířit napěťová vlna, která zčásti projde a zčásti se odrazí v místě změny impedance kabelu. Dojde-li vlna na rozpojený konec kabelu, odrazí se zpět se stejnou velikostí i polaritou. Je-li konec kabelu zkratován, odrazí se vlna s opačnou polaritou. Měnič se jeví jako napěťový zdroj s minimální vnitřní impedancí, naopak impedance motoru je z hlediska vlnových jevů

velká a motor se chová jako rozpojený konec kabelu. Kdyby nedocházelo k útlumu na kabelu, bylo by výsledné napětí v daném místě určeno interferencí působících vln.

Na svorkách motoru i měniče může působením vlnových jevů vzrůstat okamžitá hodnota napětí až na asi dvojnásobek napětí meziobvodu. Velikost těchto špiček není závislá na spínací frekvenci PWM ani na zatížení motoru. Velikost přepětových špiček závisí pouze na parametrech kabelu a strmosti vzrůstu napětí. V motoru je namáhána těmito špičkami fázová izolace mezi vodiči různých fází, hlavní izolace mezi vinutím a kostrou i izolace vinutí izolující od sebe jednotlivé části téhož vinutí. Zvýšené napěťové namáhání způsobuje rychlejší stárnutí izolace a zvyšuje riziko průrazu. Toto nebezpečí je velké zejména u starších motorů. Konstrukce novějších motorů již počítá s možností napájení z polovodičového měniče a tomu odpovídá i zvýšená elektrická pevnost použité izolace do 1 100 V u fázové a hlavní izolace a do 800 V u izolace vinutí [13].

Vliv parazitních parametrů kabelu zpravidla roste se zvětšující se délkou kabelu, ale existují i výjimky. Zmenšení délky kabelu vede ke zmenšení svodu a odporu. Tento vliv může dominovat nad snížením indukčnosti a kapacity, tím se sníží tlumení a zvýší se vliv vlnových jevů na kabelu. Jiným případem je existence určité kritické délky kabelu, při které se vlna napětí po úplném odrazu vrátí na začátek vedení v okamžiku dosažení maximálního výstupního napětí měniče (bude-li např. rychlost vlny rovna polovině rychlosti šíření světla a strmost vzrůstu napětí na výstupu měniče  $5\,000\text{ V}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ , bude kritická délka kabelu 15 m). Kromě napěťových špiček se mohou na výstupu měniče vyskytovat i proudové špičky, jež jsou vytvářeny proudy, které nabíjejí parazitní kapacity kabelu (např. u kabelu délky 150 m mohou tyto špičky dosahovat až 10 A, a to i bez připojeného motoru). Doba trvání proudových špiček může dosahovat řádově až jednotek milisekund. Proudové špičky mohou způsobovat také vybavování nadproudových ochran měniče.

### **Další rušivé vlivy na výstupu měniče**

Napájení motoru z měniče frekvence se může projevat zvýšeným hlukem motoru. Nejvíce tento jev působí při frekvencích PWM do 8 kHz. Slyšitelný hluk je výrazně eliminován zvýšením frekvence PWM nad 10 kHz. Je však třeba pamatovat na to, že se může zvýšit elektromagnetického rušení a zároveň spínací ztráty v měniči, s tím zpravidla souvisí také omezení výstupního proudu. Na hlučnost má vliv rovněž konstrukce motoru a provedení elektroinstalace.

Vzhledem ke skutečnosti, že okamžitá hodnota točivého momentu motoru je dána průběhem magnetického toku a fázového proudu, a proto, že proud je při napájení z měniče zatížen vyššími harmonickými, projeví se v tomto případě i vyšší zvlnění momentu. Zvlnění momentu závisí na konstrukci stroje, frekvenci a algoritmu PWM. Větší zvlnění momentu při napájení motoru z měniče frekvence nemá ve většině případů v podstatě žádný dopad, v ojedinělých případech se však může vyskytnout nebezpečí vzniku rezonance s mechanickými částmi zařízení.

Při napájení z měniče frekvence rostou ztráty motoru vlivem vyšších harmonických. Zvýšení ztrát závisí na konstrukci motoru, frekvenci a algoritmu PWM. Lze předpokládat, že se celkové ztráty motoru zvýší vlivem ztrát způsobených vyššími harmonickými řádově o jednotky procent. S tím je třeba počítat při dimenzování motoru a při návrhu jeho chlazení. V běžných aplikacích, kde je při dimenzování vždy uvažována určitá rezerva, nemusejí být zpravidla tyto ztráty zvlášť zohledňovány.

## **2.6.2 Možnosti odstranění rušivých vlivů u frekvenčně řízených pohonů**

### **Na vstupu měniče:**

- K odstínění vysokofrekvenčního rušení se používá **vstupní** odrušovací filtr. Tento filtr je nutné ve spojení s měničem frekvence vždy použít. Měniče frekvence některých výrobců již mají tento filtr standardně zabudován. Vstupní filtr zabraňuje pronikání rádiového rušení do sítě v rozsahu 150 kHz – 30 MHz. Filtry se dimenzují podle vstupního proudu měniče a obvykle snesou proudové přetížení 150 % po dobu asi 2 min.
- Pro vylepšení harmonického spektra proudu a snížení zatížení diod vstupního usměrňovače špičkovými hodnotami vstupního proudu je nutné na vstup měniče zapojit **vstupní tlumivky**. Použití tlumivek je nezbytné zejména v případě „tvrdé“ napájecí sítě, je-li síťový přívod dimenzován na více než desetinásobek jmenovitého vstupního proudu měniče.
- Efektivním řešením kompatibility měniče se sítí je použití vstupního kompatibilního usměrňovače namísto diodového.

### **Na výstupní straně měniče:**

Rozhodujícím kritériem pro použití odrušovacích prostředků na výstupu měniče je délka propojovacího kabelu mezi měničem a motorem. Je-li kabel kratší než 20 až

30 m, výstupní odrušovací prostředky se zpravidla nepoužívají. Při větších délkách kabelu je však použití výstupních odrušovacích prostředků vždy nutné. Nicméně i při menších délkách kabelu je třeba volit postup podle podmínek konkrétní aplikace. Nepříznivé vlivy měniče na výstupu lze omezovat několika způsoby:

- Použití **výstupních tlumivek**, které omezí strmost nárůstu napětí  $du/dt$  na svorkách motoru a velikost proudových a napěťových špiček. Při volbě indukčnosti výstupní tlumivky se pro daný měnič bere přibližně třetinová hodnota indukčnosti vstupní tlumivky.
- Zapojením **filtrů  $du/dt$** , jejich vliv je podobný jako při použití výstupních tlumivek. Filtry snižují strmost napětí pod  $500 \text{ V}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ . Při použití filtru  $du/dt$  a napětí napájecí sítě 400 V nepřesahují přepěťové špičky na motoru 1 000 V.
- **Sinusový filtr**. Těto filtr téměř beze zbytku eliminuje rušivé účinky PWM, tj. na výstupu sinusového filtru mají napětí a výstupní proud v podstatě sinusový průběh. Kromě odstínění nežádoucích účinků působících na motor omezuje sinusový filtr výrazně i elektromagnetické rušení. Sinusový filtr je nejčastěji řešen jako g-článek s obvodem LC.
- Velký význam pro omezení rušivých vlivů má správné provedení **stínění**. Stínění využívá princip Faradayovy klece. V případě dokonalé Faradayovy klece není nutné její uzemňování. V ideálním případě dokonalého odstínění by Faradayova klec obepínala celou soustavu pohonu tj. motor, měnič i kabeláž. To v praxi není možné, a proto je v reálných případech snaha přiblížit se v maximální možné míře ideálnímu stavu.

### 2.6.3 Obecné zásady EMC pro instalaci frekvenčně řízených pohonů:

- a) Pro řídicí signály je třeba používat stíněné kabely a stínění spojovat se zemí na jednom nebo na obou koncích.
- b) Mezi motorem a měničem je nezbytné vždy používat stíněný silový kabel.
- c) Při montáži v rozváděči je třeba zabezpečit co největší plochu vodivého styku měniče a montážní desky.
- d) Spolu související páry signálových vodičů mají být vedeny společně, odolnost proti rušení se zvýší vzájemným spletením těchto vodičů.
- e) V rozváděči je třeba prostorově oddělit silové a řídicí komponenty.

### **3 Metody měření EMI**

V předchozích kapitolách byla mnohokrát zmíněna nezbytnost ověřovat odolnost zařízení proti elektromagnetickému rušení a měřit emise rušivých signálů. Taková měření se nejčastěji provádějí podle standardizovaných postupů uvedených v příslušných normách věnovaných EMC, a to zpravidla v rámci typových zkoušek při uvádění nového výrobku na trh. Zkoušky popsané základními EMC normami neobsahují pouze zkoušky předepisované v současné době, ale jsou připraveny i zkoušky další, které lze využívat v případě přísnějších požadavků. Tak jak se požadavky v oblasti EMC vyvíjejí a zpravidla zpřísnují, objevují se tyto zkoušky v nových výrobních normách mezi předepsanými zkouškami. Svou úlohu také hraje lepší vybavení zkušebních laboratoří a lepší povědomí o problematice EMC mezi odbornou veřejností. Přehled všech zkoušek EMC je popsán v základních normách EMC (Basic Standards) ve čtvrté části. Základní členění EMC zkoušek jednotlivých zařízení, je na:

- zkoušky odolnosti (EMS),
- zkoušky emisí (EMI).

Jelikož měření odolnosti jednotlivých zařízení není součástí náplně této práce, budou dále popsány pouze zkoušky emisí, nebo-li metody a postupy měření elektromagnetického rušení [14], [15]

#### **3.1 Metody měření rušivých signálů v blízkém poli**

Měření rušivých signálů představuje praktické ověření dosaženého stupně EMC navrženého či testovaného zařízení z hlediska jeho rušivého vyzařování a je tudíž jednou z nejdůležitějších částí problematiky EMC. Dosáhnutí u konkrétního zařízení absolutní kompatibility je prakticky nemožné. Měření tudíž slouží k ověření maximálních povolených přípustných hodnot vysílaných rušivých signálů. Z důvodů reprodukovatelnosti získaných výsledků měření, jsou veškerá EMC měření, jejich metody, postupy, podmínky a použité měřicí přístroje jednoznačně specifikovány příslušnými normami.

Při samotném měření je třeba brát mimo jiné i v úvahu, že i samotná měřicí zařízení mohou být jak přijímačem tak i zdrojem rušení. Pro zvolení vhodného měřicího zařízení a vhodné metody měření je rozhodující jakým způsobem se rušící

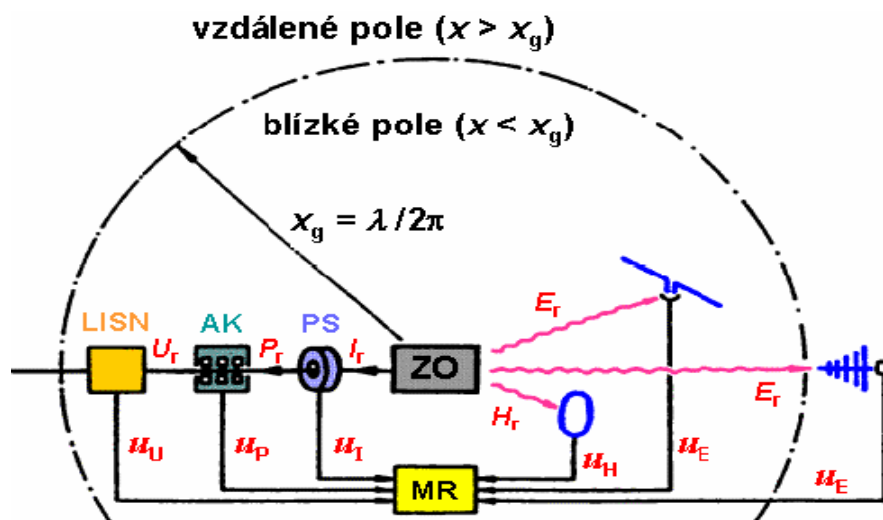


signály ze nebo do zařízení šíří. Jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách rušivé signály se šíří třemi základními cestami:

- vedením,
- přenos blížkým elektromagnetickým polem (elektrická, induktivní případně galvanickou vazkou),
- přenos vzdáleným elektromagnetickým polem (vyzařováním nebo-li elektromagnetickou vazbou).

Zatímco u přenosu pomocí vazeb, jsou měřeny charakteristickými veličinami intenzita elektrického a magnetického pole  $E_r$ ,  $H_r$ , tak u přenosu po vedení se měří rušivé napětí  $U_r$ , rušivý proud  $I_r$ , příp. rušivý výkon  $P_r$  signálu. Na obr.3.1 jsou zobrazeny základní možnosti měření rušivých signálů šířených po vedení a pomocí vazeb. Kde **MR** značí měřič rušení, reprezentovaný nejčastěji selektivním  $\mu$ V-metr, spektrálním analyzátozem či speciálním měřicím přijímačem pro požadovaný rozsah měřicích kmitočtů (obvyklé od 9 kHz do 1÷2 GHz). Měřená rušivá veličina ( $U_r$ ,  $I_r$ ,  $P_r$ ,  $E_r$  a  $H_r$ ) je snímána vhodným senzorem, jímž je převedena na napětí. Toto napětí je pak měřeno měřičem rušení **MR**. Obvyklými druhy snímačů v EMC pro měření vedených rušivých signálů jsou:

- umělá síť **LISN**,
- napěťová sonda,
- proudová sonda **PS**,
- absorpční kleště **AK**,
- a různé typy měřicích antén pro měření vyzařovaných rušivých signálů.



Obr.3.1 Způsoby měření rušivých signálů

Aby u všech druhů měření proběhlo měření správně, je nutné aby měřicí zařízení reagovalo jen na rušivé signály pocházející ze zkoušeného objektu **ZO** a nebylo ovlivněno dalšími rušivými zdroji, ať již přírodními či umělými. Rovněž rušivé signály ze samotného měřicího, zařízení musí být účinně potlačeny či jinak respektovány. Pro správné měření rušivých signálů je proto kromě kvalitního přístrojového vybavení nezbytně nutné zajistit i správné uspořádání a prostorové řešení měřicího pracoviště a jeho nejbližšího okolí.

Jelikož součástí této práce je i praktická část, jejíž součástí je měření rušení elektrického zařízení v blízkém poli pomocí měřících sond blízkého pole a vyhodnocení tohoto měření, je nutné se seznámit s postupem měření pomocí antén a měřením v blízké zóně (blízkém poli) [14].

### 3.2 Měření pomocí antén

Rušivé signály vyzařované zařízením do okolního prostoru na kmitočtech od 10 kHz do 1 GHz a výše, jsou měřeny pomocí různých typů měřících antén. Měření rušivých elektromagnetických polí pomocí antén je významné v oblasti velmi vysokých kmitočtů (od 300 MHz a výše), neboť realizace přímého měření rušivých napětí či proudů je na těchto kmitočtech velmi problematická, někdy zcela nemožná. Tabulka 3.1 udává některé druhy používaných měřících antén.

Druh antény	Rozsah kmitočtů [Hz]	Měřená složka
rámová (smyčková) anténa	9 kHz – 30 MHz	$H$
prutová anténa (monopól)	9 kHz – 30 MHz	$E$
symetrický (laděný) dipól	30 MHz – 1 GHz	$E$
bikónická anténa	20 MHz – 300 MHz	$E$
logaritmicko-periodická	200 MHz – 3 GHz	$E$
kónicko-logaritmická	200 MHz – 3 GHz	$E$
složená širokopásmová	30 MHz – 2 GHz	$E$
trychtýřová anténa	1 GHz – 40 GHz	$E, H$

Tabulka 3.1 Seznam nejčastěji používaných měřících antén

Při měření elektromagnetického rušení přijímá měřicí anténa elektrickou složku  $E_r$  či magnetickou složku  $H_r$  rušivého pole a lineárně ji převádí na výstupní napětí  $U_r$  na svých výstupních svorkách, příp. na výstupu připojeného kabelu (vedení,

napáječe). Toto napětí je pak měřeno a vyhodnocováno měřičem rušení **MR** (obr.3.1). Převod mezi velikostí vstupní intenzity pole a velikostí výstupního napětí antény udává tzv. anténní faktor  $AF [m^{-1}]$  definovaný a jako:

$$AF = \frac{E_r}{U_r} \quad (3.1)$$

často vyjadřovaný v logaritmické míře:

$$AF [dB.m^{-1}] = E_r [dBV.m^{-1}] - U_r [dBV] \quad (3.2)$$

Pro antény k měření magnetického pole je obdobně definován jejich anténní faktor pro magnetické pole:

$$AF_H = \frac{H_r}{U_r} \quad (3.3)$$

Výhodou zavedení anténního činitele  $AF$  je jeho jednoduché použití při vyhodnocování velikosti rušivého pole. Podle definice (3.2) určíme totiž hledanou (zjišťovanou) intenzitu rušivého elektrického pole  $E_r$  např. v  $[dBV/m]$  tak, že k velikosti rušivého napětí  $U_r$  v  $[dBV]$  změřeného měřičem rušení **MR** připočteme velikost anténního faktoru použité antény  $AF$  v  $[dB/m]$ :

$$E_r [dBV / m] = U_r [dBV] + AF [dB / m] \quad (3.4)$$

Anténní faktor  $AF$  je tak základním parametrem jakékoli antény pro měření elektromagnetického rušení a jeho velikost, příp. kmitočtový průběh je základním údajem každého výrobce těchto měřicích antén. Zahrnuje již v sobě dané vlastnosti antény (zisk, resp. účinnost) a zároveň i přenosové vlastnosti koaxiálního kabelu.

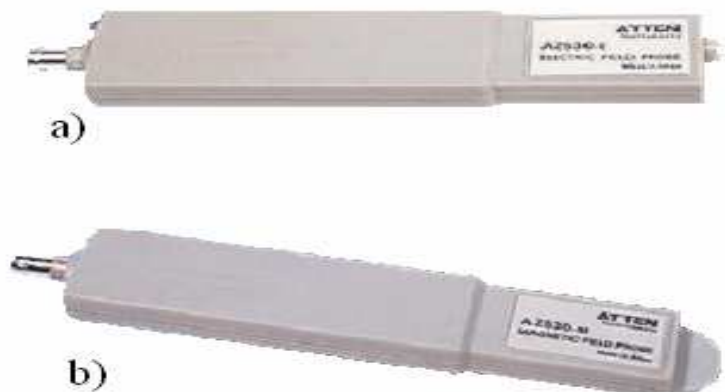
Normy EMC rozlišují tři typy měřicích míst pro anténní měření elektromagnetického rušení:

- měření na volném prostranství,
- měření v elektromagneticky stíněných prostorech
- měření v bezodrazových (absorpčních) prostorech.

V praxi je často třeba uskutečnit měření přímo na provozním pracovišti (na místě nasazení) rušivého zdroje, tj. tam, kde je či bude dané zařízení trvale umístěno a provozováno. Jde zejména o zkoušení výkonových energetických zařízení a rozměrných elektrotechnických systémů, které nelze zkoušet na zkušebním stanovišti. Před vlastním měřením je třeba proměřit celkové rušivé elektromagnetické pozadí v dané lokalitě, a to při vypnutém zkoušeném zařízení. Vlastní měření se

potom realizuje minimálně ve čtyřech ortogonálních směrech a dále případně v těch směrech, na nichž byla zjištěna největší intenzita generovaného pole. Při měření je třeba zajistit takovou konfiguraci a pracovní režim měřeného zařízení, které jsou typické pro jeho běžný provoz a v nichž je potenciálně generováno maximální rušení. Během měření je vhodné co nejvíce omezit provoz všech ostatních okolních zařízení, které by mohly přispívat k celkovému rušení a zkreslovaly by tak měřené hodnoty [26].

Rušivé signály vyzařované do prostoru jednotlivými elektronickými součástkami, obvody a funkčními bloky jsou často měřeny speciálními měřicími sondami elektrického či magnetického pole. Tyto malé ruční antény (výstižně označované jako „očíhávací“) jsou živány zejména při vývoji a diagnostice elektronických zařízení, kdy je důležité sledovat nežádoucí vyzařování jednotlivých součástek a bloků přímo uvnitř vyvíjeného zařízení a dislokovat co nejpřesněji i místo (zdroj) rušivého signálu. Měřicí sonda blízkého magnetického pole zobrazená na obr.3.2a, je obvykle tvořena malou smyčkou o průměru několika *cm*. Pro kompenzaci nežádoucího vlivu elektrického pole se někdy používají dvě smyčky zapojené vzájemně v protifázi. Základem měřicí sondy elektrického pole zobrazené na obr.3.2b, je obnažený konec středního vodiče koaxiálního kabelu o délce 6 až 10 mm. Měření pomocí měřicích sond není příliš dobře reprodukovatelné, neboť výsledek závisí na mnoha neurčitých faktorech (míra přiblížení sondy ke zdroji rušení, úhel či natočení sondy vůči zdroji rušení apod.). Uvedená měření proto nejsou regulována žádnými normami či předpisy a dávají „jen“ relativní představu o intenzitě rušivého vyzařování v daném místě či v daném obvodu. S výhodou se tyto sondy rovněž užívají ke kontrole elektromagnetické těsnosti stínících krytů a k identifikaci místa největšího úniku záření z nich [5].



Obr.3.2 Měřicí sondy pro blízké elektrické (a) a magnetické pole (b)

Výsledky a správnost měření elektromagnetického rušení pomocí antén závisí jak na technických parametrech použitých antén, tak i na uspořádání a druhu měřicího pracoviště (měřicího místa).

### 3.3 Rozdělení elektromagnetického pole podle vzdálenosti od zdroje

Antény, elektronické obvodové desky a další vodivé součásti vyzařují elektromagnetickou energii. Tato energie může přes kapacitní nebo induktivní vazbu a vyzařování ovlivňovat jiné zařízení. Kapacitní a induktivní vazba se projeví jen několik málo vlnových délek od vyzařovaného objektu. Naopak vyzařování (šíření volným prostranstvím) má velký rozsah působnosti. Záření ze zdroje k přijímači rušení prochází přes tři regiony. Přejechody mezi tyto regiony nejsou přesné a změny mezi nimi jsou postupné [15].

#### 3.3.1 Blízká reaktanční oblast pole

Jedná se o oblast nejbližší vyzařovanému objektu (reactive near-field region), kde převládá reakční pole. Je definována vnitřkem koule (středem koule je zdroj vyzařování elmag. energie) o poloměru:

$$r \approx 0,62 * (d^3 / \lambda)^{-2}, \quad (3.5)$$

kde  $d$  = největší rozměr antény.

Pro zjednodušení lze definovat oblast reaktivního pole obecně poloměrem:

$$r \approx \lambda \quad (3.6)$$

K určení výkonové hustoty a impedance je nutné měřit zvlášť elektrické a magnetické pole. Hustota energie se rozkládá velmi rychle s rostoucí vzdáleností od zdroje. V této oblasti se obvykle měří rušení ve vodičích a v obvodových deskách s plošnými spoji. V blízkém poli neplatí popis rovinnou vlnou a konstantní poměr elektrické a magnetické složky pole. V této oblasti je v elektromagnetickém poli nejvíce zastoupena složka, která sice osciluje s frekvencí zdroje, není však vyzařována. Mezi intenzitou elektrického pole a intenzitou magnetického pole neplatí v této oblasti vztah jako v rovinné vlně, podle konstrukce zdroje může v reaktivním poli zcela převládat elektrické pole nebo magnetické pole: má-li zdroj například tvar smyčky protékané proudem, převládá v jeho reaktivní zóně pole magnetické, v blízkosti oscilujícího elektrického dipólu je naopak významnější pole elektrické[16].

### 3.3.2 Blízká zářivá oblast pole - Fresnelova oblast

Je oblast mezi blízkou reaktanční oblastí a vzdálenou oblastí pole, kde převládá zářivé pole (radiating near-field region). Je definována vnitřkem koule o poloměru:

$$r \approx \frac{2d^2}{\lambda} \quad (3.7)$$

Měření  $E$  a  $H$  pole přímo souvisí s impedancí prostředí ( $377 \Omega$ ), hustota energie zůstane relativně stálá v různých vzdálenostech od zdroje, ačkoliv je zde lokalizováno energetické kolísání. V této oblasti se obvykle provádí měření blízkého pole pomocí antén a měření v bezodrazových komorách. Elektromagnetické pole má složitou prostorovou strukturu způsobenou interferencí (nazývanou podle analogie z optiky Fresnelovou difrakcí) vln s různou fází vycházejících z různých míst zdroje (antény). Výpočet této struktury je obtížný při měření nutné používat sondu s malými rozměry, získat v posuzovaném místě dostatečně hustou prostorovou síť měřených bodů v různých vzdálenostech od zdroje a podle potřeby posuzovat jak průměrnou hodnotu, tak i lokální maxima intenzity pole. Interference typu Fresnelovy difrakce se vyskytuje i při průchodu rovinné vlny otvorem nebo v blízkosti sekundárních zářičů [16].

### 3.3.3 Vzdálená oblast - Fraunhoferova oblast

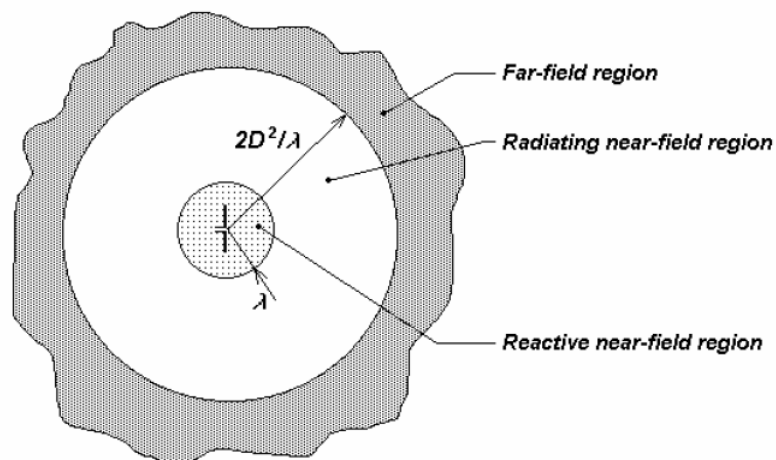
Je nejvzdálenější oblast od zdroje záření (far field). Elektromagnetické pole má charakter rovinné vlny nebo rovinné vlně blízký teprve ve vzdálenosti od zdroje větší než:

$$r \geq \frac{2d^2}{\lambda} \quad (3.8)$$

pro anténu, nebo obecně:

$$r > \frac{\lambda}{2\pi} \approx \frac{1}{6} \lambda \quad (3.9)$$

Měření E a H pole přímo souvisí s impedancí prostředí (377 Ω), hustota energie se rozkládá podle zákona reciprokých čtverců s vzdáleností. V této oblasti se provádí měření vzdáleného pole. Vzdálené pole je pro posuzování úrovně rušení vhodnější, protože může být popsáno rovinnou vlnou a přijímač i vysílač mohou být uvažovány jako náhradní anténa. Je to oblast postupné (přibližně) rovinné elektromagnetické vlny. V této oblasti je vektor elektrického pole kolmý k vektoru magnetického pole, jejich fáze je stejná a směr obou kolmý na směr šíření vlny. Při měření stačí v tomto případě zjistit jen jednu z obou veličin, druhá se z ní dá vypočítat, a stejně se z ní dá vypočítat hustota zářivého toku. Většina měřicích zařízení, která ukazují na výstupu hustotu zářivého toku (W/m<sup>2</sup>), ve skutečnosti měří intenzitu elektrického pole a přepočítává ji na výkonovou veličinu. Může to způsobit velkou chybu v případě, že se měří v blízkém poli zdroje. Hustotu zářivého toku přímo měří přístroje s tepelným čidlem (termistorem, bolometrem). Zákon reciprokých čtverců lze stručně vysvětlit tak, že energie vyzařovaná zdrojem je nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti od zdroje. Tedy objekt B (o stejné velikosti jako objekt A) nacházející se ve dvakrát větší vzdálenosti od zdroje záření než objekt A, přijímá pouze ¼ energie oproti objektu A [16].



Obr.3.3 Rozdělení oblastí elektromagnetického pole podle vzdálenosti od zdroje

### 3.4 Měření v blízkém poli v rozmezí 100 kHz - GHz

Nejvíce EMI měření se provádí do frekvencí 1 GHz. Protože vlnové délky těchto frekvencí jsou velké, měření se provádí v reaktančním blízkém poli. Pokud mluvíme o měření v blízkém poli, máme na mysli pole nacházející se v oblasti do  $2d^2/\lambda$  ( $\lambda/2\pi$ ) tedy oblast zářivého a reaktančního pole. Pro měření v blízkém poli se používají sady antén nebo sond pro měření  $E$  a  $H$ , jež jsou zobrazeny na obr.3.2. Dále je nutný přijímač rušení. Je-li v intervalu od 0 Hz do 300 GHz známá frekvence zdroje a je-li časový průběh pole (přibližně) sinusový, není nutné aby měřicí přístroj rozeznával nebo zaznamenával frekvenci měřeného pole. Pro měření je v tom případě možné použít jednoduchý širokopásmový měřič intenzity elektrického nebo magnetického pole. Není-li frekvence zdroje záření známa, nebo je-li měřené pole vytvářeno ve vyšetřovaném místě několika zdroji s různou frekvencí nebo jsou-li v poli významně zastoupeny kromě základní frekvence i její vyšší harmonické, je nejvhodnější použít k měření spektrální analyzátor. Jeho základní předností je rychlé vizuální zobrazení měřeného rušivého spektra na displeji, a tím získání celkového přehledu o elektromagnetickém rušení v daném kmitočtovém pásmu. Kvalitní spektrální analyzátory pro měření EMI, na rozdíl od analyzátorů pro obecné použití, však musí rovněž splňovat všechny hlavní požadavky normy ČSN - CISPR 16 - 1 kladené na měřicí přijímače, tj. zejména šířku propustného pásma, vstupní impedanci, impulsní odezvu, selektivitu, účinnost stínění a další. U polí s nízkou frekvencí je vhodné mít k dispozici osciloskop, který zaznamenává časově proměnný průběh výstupního napětí vhodného čidla a umožní jeho následné zpracování. Zcela nezbytné to je u pole s nesinusovým časovým průběhem. [17]



## **4 Analýza vlivu elektromagnetického pole na lidský organismus a hygienické normy**

Každý z nás je denně vystavován neviditelnému působení širokého spektra elektromagnetických polí. V posledních dvou desetiletích však bouřlivý rozvoj a zavádění pokrokových technologií i široké používání důmyslných strojů, přístrojů a zařízení zvýšily význam zatěžování životního prostředí elektromagnetickými poli, tzv. elektrosmogem (správný vědecký termín je neionizující záření). Elektrosmogem tedy souhrnně nazýváme elektromagnetická pole a vlny, která vznikají v důsledku technické činnosti člověka a vykazují účinek na okolní prostředí. Tato pole a vyzařování se vyskytují v menší či větší míře všude tam, kde dochází k přenosu elektrické energie, k používání elektrických zařízení či elektromagnetických vln k přenosu informací (tzv. radiové vlny). Najdeme je tedy jak ve volné přírodě, tak v budovách. Obecně je rozdělujeme na nízkofrekvenční (do 30 *kHz* - např. pole kolem vodičů střídavého proudu) a vysokofrekvenční (do 300 *GHz* - např. radiové vlny, mobilní sítě, mikrovlny). U nízkofrekvenčních lze samostatně měřit elektrickou a magnetickou složku.

Výsledky současných výzkumů jsou často protichůdné nebo nejasné. To vede jen k dalšímu stupňování obav a zvyšování nedůvěry veřejnosti k proklamované elektromagnetické bezpečnosti v našem životním prostředí. Zatím jsou nejvíce objasněny a zpracovány tzv. tepelné účinky u vysokofrekvenčních polí (10 *kHz* – 1 *GHz*). Jedná se o účinky, které se objeví jako výsledek ohřevu tkání vystavených vysokým účinkům těchto kmitočtových úrovní. Naopak tzv. netepelné účinky, což jsou účinky projevující se po déle trvající expozici elektromagnetického pole s relativně nízkou výkonovou úrovní na centrální nervový, srdečně cévní a krvetvorný imunitní systém, nebyly zatím prokázány.

### **4.1 Vliv elektromagnetických polí na lidský organismus**

Protože člověk nemá smyslové orgány pro elektromagnetické pole, tak jej nevnímá. Silné elektrostatické pole může způsobit pouze naježení dlouhých odpuzujících se vlasů. Elektromagnetická pole však ovlivňují vodivé tělní tekutiny a tedy i nervové dráhy. Pokud je člověk vystaven jenom příležitostně vlivům slabých elektromagnetických polí a pokud se jedná jen o pole indukovaná v zařízeních

nízkého napětí (do 1 000 V), nemusí se obávat škodlivých účinků. Jiná je ovšem situace v blízkosti antén radarů a vysílačů. Zvláště nebezpečné je rentgenové záření a záření magnetronu mikrovlnné trouby (2 450 MHz), která může být v provozu jen se zavřenými dvířky. Zdravotní účinek těchto polí a záření na lidský organismus je tedy závislý na typu záření, jeho frekvenci, intenzitě (ta klesá se vzdáleností od zdroje) a době působení, jakož i na vnímavosti konkrétního člověka (obecně jsou k těmto veličinám vnímavější děti, staré a nemocné osoby, a tzv. elektrosenzibilní jedinci se zvýšenou citlivostí vůči elektromagnetismu). Elektrické proudy velmi malých hodnot protékají lidským tělem i při absenci vnějších elektrických polí. K tomu dochází v důsledku chemických reakcí, které probíhají v lidském organismu jako součást běžných tělesných funkcí. Většina biochemických reakcí, počínaje zažíváním a mozkovou aktivitou konče, je provázána pohybem elektricky nabitých částic. Také naše srdce je elektricky aktivní, a jeho aktivitu mohou tak lékaři sledovat pomocí elektrokardiogramu. Někteří lidé se domnívají, že jejich drobné potíže, bolesti hlavy, deprese, letargie, poruchy spánku, nebo dokonce i křeče či epileptické záchvaty jsou důsledkem působení elektrických nebo magnetických polí. Domněnku elektromagnetické přecitlivělosti podporuje jeden malý vědecký důkaz z nedávných skandinávských studií. Bylo zjištěno, že jednotlivé osoby, které byly vyšetřovány za přísně kontrolovaných podmínek expozic elektromagnetickým polem, nemají shodné biologické reakce, a že neexistuje ani žádný přijatelný biologický mechanismus, kterým by bylo možné tuto různou přecitlivělost vysvětlit. Výzkum v této oblasti je zvláště obtížný právě proto, že je ve hře mnoho jiných tělesných pochodů interního původu, které s expozicí elektromagnetickým polem přímo nesouvisí.

Zájem široké veřejnosti zvláště o působení elektromagnetických statických polí a polí o velmi nízkých frekvencích (ELF - Extremely Low Frequency) na lidské zdraví stále roste. Pole ELF lze z hlediska zdraví obyvatelstva považovat za významná, a to především pro masové využívání elektrické energie s frekvencemi 50 nebo 60 Hz ve většině zemí světa [13], [18].

#### **4.1.1 Statická elektrická pole**

Vnitřek jakéhokoliv vodivého předmětu, tedy i lidského těla, je před statickým elektrickým polem chráněn svým povrchem. Statické elektrické pole indukuje elektrický náboj na povrchu exponované osoby, což se může projevit např. ježením chloupků po těle. Kromě toho může „nabitá“ osoba dotykem s kovovým předmětem

utrpět elektrický šok. Účinky elektrických polí jsou až do  $20 \text{ kV.m}^{-1}$  považovány za neškodné a žádné další přímé vlivy na lidský organismus nejsou známy. Studie vlivu statického elektrického pole byly mimo jiné zaměřeny také na periodické rytmy v lidském organismu a v těle hlodavců, na hematologii, rozmnožování a přežívání v organismech zvířat před narozením a po něm. Žádná z uskutečněných studií neprokázala jakékoliv negativní zdravotní účinky statických elektrických polí (s výjimkou nebezpečí elektrického šoku při vybití elektrostatického náboje z povrchu těla). V tomto smyslu se další výzkum nepovažuje za nutný.

#### **4.1.2 Statická magnetická pole**

Permeabilita lidského těla je stejná jako vzduchu, magnetické indukční linie jím procházejí bez potíží. Tělo je tedy bezbranné vůči jejich průniku. Pomoci mohou jen speciální ochranné pomůcky, ty však současně omezí i příznivé působení magnetického pole Země. Vliv magnetických polí na organismus se projevuje uvnitř těla tzv. "indukovanou proudovou hustotou", udávanou v  $\text{A.m}^{-2}$  nebo v  $\text{mA.cm}^{-2}$ . Na rozdíl od elektrických polí mohou tedy statická magnetická pole volně pronikat biologickými tkáněmi, a bezprostředně tak vzájemně reagovat s pohybujícími se náboji (ionty, proteiny apod.) a magnetickým materiálem, který je v tkáních vytvářen některými fyzikálními mechanismy. Jsou-li hodnoty statických magnetických polí na běžné environmentální úrovni, jsou z těchto mechanismů významné pouze indukce statických elektrických polí a proudy v tkáních. Přestože vnější statická elektrická pole nemohou pronikat lidským tělem, mohou vnější statická magnetická pole být příčinou vzniku elektrických polí uvnitř těla. Mnoho studií statických magnetických polí bylo zaměřeno na působení statických magnetických polí na buňky a buněčné složky, genetický materiál, embryonální vývoj, centrální nervovou soustavu, chování apod. Celkově lze říci, že výsledky těchto studií nenaznačují škodlivé účinky působení těchto polí na základní vývoj, behaviorální a fyziologické parametry při krátkodobých expozicích až do hodnoty asi  $2 \text{ T}$ . Dlouhodobé působení pole nízké úrovně řádově  $2 \text{ T}$  se projevuje v odezvách centrálního nervového systému, kardiovaskulárního a endokrinního systému. U silných stacionárních polí se předpokládá, že krátkodobá expozice v poli nad  $5 \text{ T}$  může vyvolat výrazně škodlivé účinky, které se mohou projevit snížením rychlosti krevního toku v aortě a významným snížením pracovní schopnosti. [19]

Některé studie, které se zaměřily na profesní zatěžování, zaznamenaly zvýšené riziko úmrtnosti a vzniku rakoviny. Nicméně tyto studie nebyly očištěny od možného spolupůsobení dalších karcinogenů a látek znečišťujících životní prostředí, které se vyskytovaly ve sledovaných průmyslových oblastech. Proto není možné bez dalšího podrobného šetření a vyhodnocení zdravotních dopadů těchto faktorů připisovat zvýšené zdravotní riziko pouze působení magnetického pole.[18],

#### **4.1.3 Elektromagnetická pole ELF**

Elektromagnetická pole jsou složena z elektrických a magnetických vln, které se pohybují společně. Tyto vlny se šíří rychlostí světla a jsou charakterizovány frekvencí a vlnovou délkou. V situacích v praxi působí elektrická a magnetická pole nezávisle na sobě.

#### **4.1.4 Elektrická a magnetická pole ELF**

Stejně jako statická elektrická pole jsou příčinou vzniku náboje, tak i oscilující pole vytváří indukci náboj, který se spojitě a pravidelně mění v čase. Konstantní tok povrchového náboje zase vyvolává oscilující vnitřní elektrické pole a elektrický proud. Tyto jevy jsou závislé na frekvenci a pro rozsah  $nf$  jsou velmi slabé povahy (pro srovnání: indukovaná, tj. vnitřní elektrická pole jsou milionkrát slabší než vnější pole). Oscilující magnetická pole rovněž mohou indukovat elektrická pole, avšak většinou jen v povrchových tkáních. Tyto jevy jsou také závislé na frekvenci a pro  $nf$  bývají rovněž slabé povahy. Naproti tomu přechodná magnetická pole, která vznikají při spínacích procesech, mohou indukovat silná elektrická pole a proudy, avšak pouze po velmi krátkou dobu.

Jestliže úroveň indukovaných elektrických polí a proudů překročí úroveň přirozených tělesných elektrických signálů, je možné pozorovat poměrně značné množství účinků těchto polí. Navzdory rozporným nebo neopakovatelným výsledkům uvádějí některé studie (mimo živé organismy) nejrůznější účinky elektrických a magnetických polí i při nižších úrovních (např. změny v buněčném bujení, v metabolismu, v genové expresi, proteosyntéze, enzymových aktivitách aj.). Tato pozorování však nemusí nutně svědčit o negativních zdravotních účincích na lidský organismus. Z výsledků studií elektrických polí lze vyvodit, že kromě podráždění z elektrického náboje, který je indukován na povrchu těla, jsou účinky [18]:

- elektrických polí do  $20 \text{ kV.m}^{-1}$  neškodné,

- nebyly prokázány ani žádné vlivy na rozmnožování nebo vývoj zvířat u intenzit nad  $100 \text{ kV.m}^{-1}$ .

Výsledky studií magnetických polí částečně potvrzují experimentální důkazy o tom, že magnetická pole ELF mohou ovlivňovat fyziologii a chování při intenzitách, které se vyskytují v domácnostech nebo v okolním prostředí [19].

- Do úrovní indukované proudové hustoty  $1 \text{ mA.cm}^{-2}$ , což je do indukce  $100 \text{ mT}$  na  $3 \text{ Hz}$  a  $5 \text{ mT}$  na  $50 \text{ Hz}$  nebyly dosud zaznamenány žádné biologické účinky.
- V rozsahu  $1\text{-}10 \text{ mA.cm}^{-2}$ , to je  $100 - 1000 \text{ mT}$  na  $3 \text{ Hz}$  nebo  $5 - 50 \text{ mT}$  na  $50 \text{ Hz}$  jsou již pozorovány ovlivnění nervového systému, vizuální funkce a stimulace růstu kostí.
- Nad  $100 \text{ mA.cm}^{-2}$ , to je  $10 \text{ T}$  na  $3 \text{ Hz}$  nebo  $500 \text{ mT}$  na  $50 \text{ Hz}$ , již hrozí akutní poškození zdraví.

Vliv polí je možné omezit ochranným opatřením. Poměrně snadno lze dosáhnout účinné ochrany před elektrickými poli s frekvencí  $50 \text{ Hz}$  použitím stínících materiálů. Stínění na střídavá elektrická pole lze s úspěchem využít i na stejnosměrná pole, ne však naopak. Dobře vodivé předměty (např. kovové ploty, zábrany a jiné kovové konstrukce), které jsou trvale umístěny v blízkosti vysokonapěťových přenosových vedení, by měly být uzemněny. V opačném případě může silové vedení tyto předměty indukci nabít na dostatečně vysoké napětí, a přivodit tak osobě pobývající v jejich těsné blízkosti, popř. kontaktem, elektrický šok. Tento šok je možné utrpět také při dotyku automobilu nebo autobusu, který by byl zaparkován pod vysokonapěťovým přenosovým vedením nebo v jeho těsné blízkosti.

#### **4.1.5 Vysokofrekvenční elektromagnetická pole**

Hlavním biologickým účinkem vysokofrekvenčních polí ( $10 \text{ kHz} - 1 \text{ GHz}$ ) je ohřev. Hodnoty expozic vysokofrekvenčními poli, kterým je člověk běžně vystavován, jsou podstatně nižší, než aby mohly vyvolat významnější ohřev. Vědci se zabývají také domněnkou, zda tepelné účinky pod prahovými hodnotami pro tělesný ohřev nejsou důsledkem spíše dlouhodobých expozic. Je však nepochybné, že elektromagnetická pole s intenzitami překračujícími určitou hodnotu se mohou projevit biologickými účinky. Výsledky experimentů, které byly uskutečňovány na

zdravých dobrovolníků naznačují, že krátkodobé expozice s hodnotami obvyklými v našem životním prostředí nebo domácnostech nejsou příčinou žádných zjevných škodlivých účinků.

## 4.2 Hygienické normy

Mezinárodní směrnice hygienických limitů expozic pro všechna elektromagnetická pole byly vytvořeny Mezinárodní komisí pro ochranu před neionizujícím zářením (ICNIRP). Jedná se o nevládní organizaci, která je oficiálním partnerem Světové zdravotnické organizace (WHO) v mezinárodním projektu elektromagnetického pole. Obecně platí, že expozice elektromagnetickými poli v rámci stanovených hygienických limitů, nejsou příčinou žádných známých negativních zdravotních účinků. Od úrovně, jejíž hodnoty jsou prokazatelně příčinou zdravotních účinků, je aplikován vysoký koeficient bezpečnosti. Proto při krátkodobé expozici elektromagnetickým polem s intenzitou třeba i několikanásobně převyšující stanovený hygienický limit, se bude výsledný účinek stále ještě nacházet ve zdravotně bezpečné oblasti. Důležitý je však ještě jeden činitel, a to vazba. Vazbou je myšleno vzájemné působení mezi elektrickými a magnetickými poli a exponovanou osobou. Tento činitel závisí na velikosti a tvaru těla, typu tkáně a orientaci těla vzhledem k poli. Avšak směrnice ICNIRP jsou v tomto smyslu konzervativní a vždy u exponované osoby předpokládají maximální vazbu pole. To zaručuje minimální zdravotní riziko při dodržování hygienických limitů [13].

Hygienické normy nám tedy stanovují mezní hodnoty elektromagnetického pole, vyskytující ho se v námi kontrolovaném prostředí. Tyto normy vydává každý stát sám, s platností pro území daného státu, přičemž většinou vycházejí z výsledků mezinárodních hygienických směrnic. Důležité je zde i uvést, že v posledních několika letech došlo v ČR (a zřejmě i v jiných zemích) ke změně platných hygienických norem, a tím i k změně hodnot mezních neboli bezpečných hodnot elektromagnetického záření. Paradoxem však došlo ke zmírnění těchto hodnot. V minulosti bylo důvodem ke změně, umožnit činnost technologii mobilní telefonie, respektive umožnění provozování sítě výkonových vysílačů mobilních operátorů i v zastavěných, tedy městských oblastech. V poslední době se spekuluje, že nově vydaná Vyhláška ministerstva zdravotnictví č.1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, nabývající účinnosti dne 30. dubna 2008, souvisí s plánovanou možností umístění amerického radaru na území ČR, respektive jeho

vliv na zdraví obyvatel v jeho okolí. Nezbyvá než doufat, že vzhledem k faktu, že limity hygienických norem jsou stanovovány s dostatečnými rezervami, tak nově stanovené bezpečné hodnoty elektromagnetického záření budou i tak v dostatečné vzdálenosti od hodnot, které mohou být pro člověka škodlivé.

#### **4.2.1 Vyhláška č.1/2008 Sb**

Jedná se o nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Toto nařízení zpracovává příslušný předpis Evropských společenství (Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/40/ES ze dne 29. dubna 2004 o minimálních požadavcích na bezpečnost a ochranu zdraví před expozicí zaměstnanců rizikům spojeným s elektromagnetickými poli) a upravuje:

- hygienické limity neionizujícího záření, metody a způsob jejich zjišťování a hodnocení a minimální rozsah opatření k ochraně zdraví při práci,
- nejvyšší přípustné hodnoty expozice zaměstnanců a fyzických osob v komunálním prostředí (dále jen „ostatní osoby“) neionizujícímu záření, způsob jejího zjišťování a hodnocení,
- hodnocení rizika neionizujícího záření ve frekvenční oblasti od  $0 \text{ Hz} - 3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$ ,
- způsob zařazení laserů do tříd a jejich označení, způsob opatření laserů výstražným textem nebo signalizací, rozsah údajů technické dokumentace laseru nezbytných pro ochranu zdraví a minimální technická a organizační opatření k omezení expozice zářením laserů,
- případy označení míst, ve kterých expozice může překročit nejvyšší přípustné hodnoty, výstrahou,
- minimální rozsah informací pro zaměstnance o ochraně zdraví při práci spojené s expozicí neionizujícímu záření.

Podle tohoto nařízení se nejvyšší přípustné hodnoty expozice neionizujícímu záření rozumí:

- neionizujícím zářením jsou statická magnetická a časově proměnná elektrická, magnetická a elektromagnetická pole a záření s frekvencemi od  $0 \text{ Hz} - 1,7 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ ,
- nejvyššími přípustnými hodnotami se rozumí mezní hodnoty expozice, které vycházejí přímo z prokázaných účinků na zdraví a z údajů o jejich biologickém

působení a jejichž dodržování zaručuje, že osoby, které jsou vystaveny neionizujícímu záření, jsou chráněny proti všem známým zdravím škodlivým účinkům,

- referenčními hodnotami se rozumí velikosti přímo měřitelných parametrů, kterými jsou intenzita elektrického pole, intenzita magnetického pole, magnetická indukce a hustota zářivého toku.

Dodržení nejvyšších přípustných hodnot modifikované proudové hustoty indukované v těle, měrného v těle absorbovaného výkonu a hustoty zářivého toku se zjišťuje výpočtem nebo měřením:

- na modelech (fantómech) lidského těla nebo jeho částí, nebo
- hodnot intenzity elektrického pole, magnetické indukce, hustoty zářivého toku, kontaktního a indukovaného proudu tekoucího kteroukoli končetinou, nebo hustoty dopadnuvší zářivé energie, zjištěných pro posuzovanou situaci, a jejich srovnáním s referenčními úrovněmi těchto veličin v tabulkách.

<b>Referenční úrovně intenzity elektrického pole E – nepřetržitá expozice</b>			
<b>Zaměstnanci</b>		<b>Ostatní osoby</b>	
<b>frekvence <math>f</math> [Hz]</b>	<b>E [V.m<sup>-1</sup>]</b>	<b>frekvence <math>f</math> [Hz]</b>	<b>E [V.m<sup>-1</sup>]</b>
< 1	– a)	< 1	– a)
1 – 8	20000	1 – 8	10000
8 – 25	20000	8 – 25	10000
25 – 820	$5 \cdot 10^5 / f$	25 – 800	$2,5 \cdot 10^5 / f$
50	10000	50	5000
820 – $3 \cdot 10^3$	610	800 – $3 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^5 / f$
$3 \cdot 10^3$ – $65 \cdot 10^3$	610	$3 \cdot 10^3$ – $150 \cdot 10^3$	87
$65 \cdot 10^3$ – $10^6$	610	$150 \cdot 10^3$ – $10^6$	87
$10^6$ – $10^7$	$610 \cdot 10^6 / f$	$10^6$ – $10^7$	$87 \cdot 10^3 \cdot f^{0,5}$
$10^7$ – $4 \cdot 10^8$	61	$10^7$ – $4 \cdot 10^8$	28
$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{-3} \cdot f^{0,5}$	$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$1,375 \cdot 10^{-3} \cdot f^{0,5}$
$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	137	$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	61

Tabulka 4.1 Referenční úrovně intenzity el. pole E



a) Referenční úroveň pro statické elektrické pole není zavedena. Při pobytu v silném statickém elektrickém poli je však třeba snížit vliv nepříjemného pocitu způsobeného elektrickým nábojem indukovaným na povrchu těla a zabránit sršení výbojů z povrchu těla.

Referenční úrovně pro intenzitu elektrického a magnetického pole (magnetickou indukci) uvedené v tabulkách 4.1 a 4.2, platí pro pole neporušené přítomností osob v posuzovaném prostoru. Je-li pole prostorově silně nehomogenní, srovnává se s referenční úrovní buď intenzita pole průměrovaná přes oblast odpovídající poloze hlavy exponované fyzické osoby, nebo se pro srovnání s referenční úrovní bere hodnota v geometrickém středu této oblasti. Pokud není výslovně uvedeno jinak, jsou stanovené referenční úrovně v efektivních hodnotách příslušných veličin. Při expozici jen rukou nebo nohou je přípustné referenční hodnoty zvýšit nepřímo úměrně poměru lineárního rozměru exponované části těla k lineárnímu rozměru trupu. Je-li současně přítomné i pole magnetické, je pro srovnání s referenční hodnotou nutné použít vztahy (4.1) – (4.4).

<b>Referenční úrovně pro magnetickou indukci B – nepřetržitá expozice</b>			
<b>Zaměstnanci</b>		<b>Ostatní osoby</b>	
<b>frekvence <math>f</math> [Hz]</b>	<b>B [T]</b>	<b>frekvence <math>f</math> [Hz]</b>	<b>B [T]</b>
< 1	0,28 *	< 1	0,056 *
1 – 8	$0,2 / f^2$	1 – 8	$0,04 / f^2$
8 – 25	$0,025 / f$	8 – 25	$0,005 / f$
25 – 820	$25 \cdot 10^{-3} / f$	25 – 800	$0,005 / f$
50	$500 \cdot 10^{-6}$	50	$100 \cdot 10^{-6}$
820 – $3 \cdot 10^3$	$30,7 \cdot 10^{-6}$	800 – $3 \cdot 10^3$	$6,25 \cdot 10^{-6}$
$3 \cdot 10^3$ – $65 \cdot 10^3$	$30,7 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^3$ – $150 \cdot 10^3$	$6,25 \cdot 10^{-6}$
$65 \cdot 10^3$ – $10^6$	$2 / f$	$150 \cdot 10^3$ – $10^6$	$0,92 / f$
$10^6$ – $10^7$	$2 / f$	$10^6$ – $10^7$	$0,92 / f$
$10^7$ – $4 \cdot 10^8$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	$10^7$ – $4 \cdot 10^8$	$0,092 \cdot 10^{-6}$
$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$10^{-11} \cdot f^{0,5}$	$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$4,6 \cdot 10^{-12} \cdot f^{0,5}$
$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	$0,20 \cdot 10^{-6}$

Tabulka 4.2 Referenční úrovně magnetické indukce B

\* amplituda

Je-li současně přítomné i pole elektrické, je pro srovnání s referenční hodnotou nutné použít vztahy (4.1) – (4.4)

### **Expozice polím s několika frekvencemi**

Pro posouzení expoziční situace podle zjištěných referenčních úrovní při působení elektrického a/nebo magnetického pole s více různými frekvencemi se uvažuje odděleně přímá stimulace, která se uplatňuje v intervalu frekvencí od 0 Hz do 10 MHz, a tepelné působení pole, které se uplatňuje v intervalu frekvencí od 100 kHz do 300 GHz.

- a) Elektrická stimulace vyvolaná hustotou indukovaného elektrického proudu v tkáni nepřekračuje referenční hodnoty, splňují-li se zjištěné úrovně polí nerovnosti:

$$\sum_{1\text{Hz}}^{1\text{MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{f>1\text{MHz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1 \quad (4.1)$$

$$\sum_{1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{B_j}{B_{L,j}} + \sum_{f>65\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{B_j}{b} \leq 1 \quad (4.2)$$

$E_i$  – intenzita elektrického pole s frekvencí  $i$ ,

$E_{L,i}$  – referenční úroveň intenzity elektrického pole pro  $i$ -tou frekvenci,

$B_j$  – magnetická indukce s frekvencí  $j$ ,

$B_{L,j}$  – referenční hodnota magnetické indukce pro  $j$ -tou frekvenci,

$a = 610 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$  pro expozici zaměstnance a  $87 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$  pro expozici ostatních osob,

$b = 30,7 \cdot 10^{-6} \text{ T}$  pro expozici zaměstnance a  $6,25 \cdot 10^{-6} \text{ T}$  pro expozici ostatních osob.

- b) Tepelné působení, které se uplatňuje při frekvencích vyšších než 100 kHz, nepřekračuje přípustnou hodnotu, jsou-li splněny nerovnosti [9] :

$$\sum_{100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left( \frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{f>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left( \frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (4.3)$$

$$\sum_{100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left( \frac{B_j}{d} \right)^2 + \sum_{f>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left( \frac{B_j}{B_{L,j}} \right)^2 \leq 1 \quad (4.4)$$

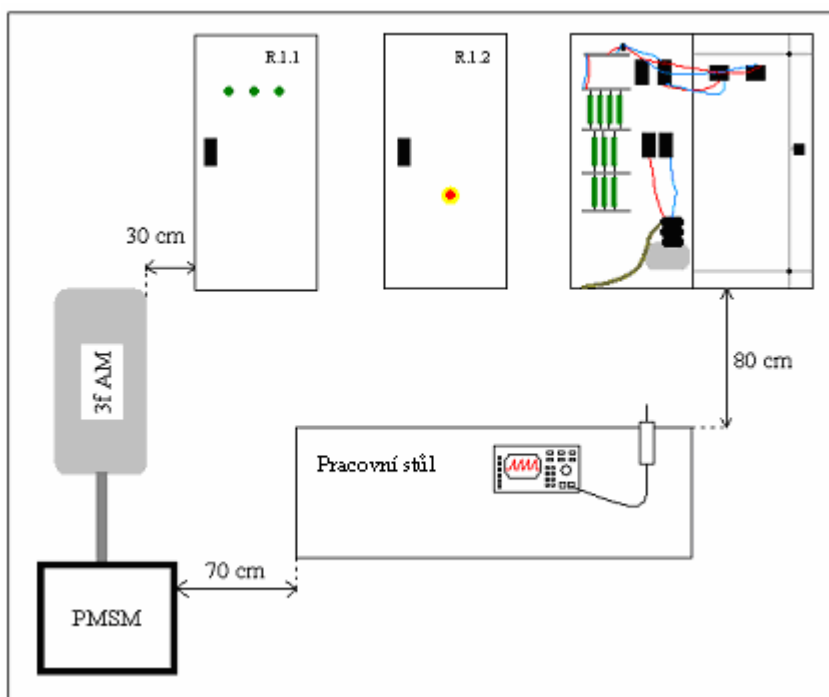
$c = 610 \cdot 106/f \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$  pro expozici zaměstnance a  $87 \cdot 103/f^{0,5} \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$  pro ostatní osoby,

$d = 2/f \text{ T}$  pro expozici zaměstnance a  $0,92/f \text{ T}$  pro ostatní osoby, frekvence  $f$  je v Hz.

# PRAKTICKÁ ČÁST

## 5 Měření EMI

Cílem měření bylo změřeni elektromagnetického rušení, vyskytujícího se na pracovišti v areálu Univerzity Pardubice Dopravní fakulty Jana Pernera, kde je umístěno zkušební zařízení STAND pro synchronní trakční motor s permanentními magnety. Schéma měřicího pracoviště je na obrázku 5.1.



Obr.5.1 Schéma měřicího pracoviště

Měřicí pracoviště se skládá z pracovního stolu, kde se nachází měřicí zařízení, reprezentované spektrálním analyzátozem a snímačem reprezentovaným měřicí sondou. Měřicím zařízením je zařízení STAND skládající se ze synchronního motoru s permanentními magnety (PMSM), z 3f asynchronního motoru a z měničů jimiž jsou tyto motory napájeny. Měnič pro asynchronní motor se nachází v rozvazovací skříni R.1.1 a měnič pro PMSM, jež je i cílovým místem měřicí sondy, je umístěn v otevřené rozvazovací skříni R.1.3. Ve skříni R.1.2 se nachází hlavní vypínač a jistič část.

## 5.1 Měřící technika

### 5.1.1 Měřič rušení

Jako rušení jsem použil spektrální analyzátor R&S FLS 3, kde v tabulce 5.1 jsou uvedeny jeho technické parametry a na obrázku 5.2 je zobrazen použitý spektrální analyzátor.

TECHNICKÉ PARAMETRY	
Frekvenční rozsah	9 kHz – 3 GHz
Rozlišení kmitočtu	1 Hz
Impedance (vf vstup)	50 $\Omega$
Impedance (nf vstup)	< 100 $\Omega$
Displej rozlišení	640 x 480 pixelů
Napájení	100 V – 240 V
Hromadné úložiště	Interní FlashDisk, USB memory stick
Rozsah zobrazení	Od zobrazeného prahu šumu do +20
Rozlišovací šířka pásma	300 Hz – 10 MHz (-3 dB) v sekvenci
<b>max. jmenovitá vstupní úroveň:</b>	
ss napětí	50 V
vf výkon CW	30 dBm (= 1 W)
špičkový vf výkon	36 dBm (= 2 W)
max. napětí impulsu	150 V

Tabulka 5.1 Technické parametry spektrálního analyzátoru



Obr.5.2 Spektrální analyzátor R&S FLS 3

### 5.1.2 Snímač rušivých signálů

Jako snímač rušivých signálů jsem použil **sadu sond HZ 530** pro indikaci blízkého pole, které byly vybrány na základě teoretického rozboru a jsou vhodné pro vyšetřování vln elektromagnetického pole v blízké zóně. Tyto malé ruční („očíhávací“) antény se užívají zejména při vývoji a diagnostice elektronických zařízení pro sledování vyzařování součástek a bloků přímo uvnitř vyvíjeného zařízení, pro co nejpřesnější dislokování zdroje rušivého signálu, příp. pro zjišťování míst elektromagnetických netěsností ve stínících krytech. Měření nejsou „regulována“ žádnými normami. Jde jen o zjištění relativní míry rušivého vyzařování v daném místě či v daném obvodu.

Sada obsahuje 3 ruční sondy a předzesilovač v pásmu 100 kHz – 1 GHz. Sonda H se používá pro indikaci magnetické složky elektromagnetického pole a pro přesnou lokalizaci zdrojů vln rušení, citlivost klesá se čtvercem vzdálenosti od zdroje. Sonda E určená pro indikaci elektrické složky elmag. pole a pro simulaci antény s velkou citlivostí pro rádio nebo TV měření účinnosti filtrů vyzařování a provádění relativního měření pro certifikační testy. Vysokoimpedanční sonda se používá pro přímé měření vyzařování na filtrech, integrovaných obvodech, tištěných spoj. atd. Tyto sondy jsou vhodné pro vstupy spektrálních analyzátorů nebo vln přijímačů. V tabulce 5.2 jsou uvedeny parametry těchto sond a na obrázku 5.3 je jejich vyobrazení.



Obr.5.3 Sada sond pro indikaci blízkého pole HZ 530

TECHNICKÉ PARAMETRY	
Frekvenční rozsah	0,1 MHz – 1 GHz
Výstupní impedance	50 Ω
Vstupní konektor	BNC
Vstupní kapacita	2 pF
Maximální bezpečná vstupní úroveň	+ 10 dBm
DC vstupní napětí	20 V max.
Napájecí napětí	6 V DC (4 ks baterie AA nebo od
Rozměry	40 x 19 x 195 mm
Spotřeba	8 mA (sonda složky H) 15 mA (sonda složky E) 24 mA (sonda vysoké impedance)

Tabulka 5.2 Technické parametry sady sond HZ 530

K měření časového průběhu a spektra napájecího signálu u signálového měniče přímo na přívodním kabelu jsem použil **vysokonapěťovou HV 250 ve spojení s** osciloskopem. Ke vstupu sondy může být připojeno napětí až 2,5 kV (DC + AC špička). přičemž amplituda vstupního napětí je závislá na kmitočtu připojeného zdroje. Sonda je zakončena BNC konektorem. Sonda je zobrazena na obrázku 5.4 a v tabulce 5.3 jsou její technické parametry.



Obr.5.4 Napěťová sonda HV 250

TECHNCKÉ PARAMETRY	
Dělicí poměr	100:1
Vstupní impedance	100 $M\Omega$ ,
Vstupní kapacita	4 $pF$
Šířka pásma	300 MHz
Časová odezva	1,2 ns
Délka kabelu	1,2 m
Kompenzované pásmo	10 - 50 $pF$
Maximální vstupní napětí DC + AC	2 500 V

Tabulka 5.3 Technické parametry napěťové sondy HV 250

## 5.2 Měřené zařízení

Měřené zařízení představoval testovací stand s trakčním synchronním motorem s permanentními magnety (PMSM) s cílovým bodem představovaným měničem pro PMSM. Tento stand byl zapůjčen Dopravní fakultě Jana Pernera Výzkumným Ústavem Železničního vozového parku za účelem výzkumu v oboru řízení motorů. Tento výzkum se provádí na synchronním motoru s permanentními magnety (PMSM), používaný pro trakci a městskou hromadnou dopravu. Mezi největší výhodu tohoto typu motoru patří největší kroutící moment na hmotnost oproti ostatním používaným trakčním motorům. To umožňuje, z hlediska konstrukce vozidla, použít tzv. přímý pohon kol, bez použití jakéhokoliv typu převodovky. Použití k přímému pohonu kol např. asynchronní motor nelze, zejména kvůli jeho velkým rozměrům. Použití přímého pohonu kol výrazně zjednodušuje konstrukci nízkopodlažních vozidel a vede i k úsporám času a financí z hlediska údržby a dalších provozních nákladů.

Stand, jak je zobrazen na obr. 5.5, je tvořen rámem, ve kterém je výkyvně usazen PMSM. Bylo zvoleno uspořádání s částečně odpruženým motorem pohánějícím kolo přes homokinetický kloub. Toto kolo je pneumaticky přitlačováno na kladku představující „rotující kolejnici“. Tímto lze vyvodit tlak na kolo v rozmezí 4 – 50 kN, reprezentující tlak skutečného kola vozidla. Motor napájen z vlastního měniče. Motor je uložen v silentblocích, které umožňují jeho výkyv v horizontálním směru.





Obr.5.5 Zkušební zařízení stand

Vlastní PMSM typu SRT 225 – S 44 je výrobkem firmy VÚES Brno, vyvinutý pouze pro tento stand. Jedná se o 44 pólový stroj s vnitřním rotorem a kapalinovým chlazením. Chlazení je provedeno pomocí kanálů v plášti statoru..Na obrázku 5.6 je detailní pohled na PMSM.



Obr.5.6 Detailní pohled na PMSM



Obr.5.7 Měnič Micromaster a Siemens

V tabulce 5.4 jsou technické parametry PMSM.

<b>TECHNCKÉ PARAMETRY</b>	
Jmenovitý výkon	58 kW
Jmenovitý moment	852 N.m
Jmenovité otáčky	650 min <sup>-1</sup>
Jmenovité napětí	3 × 368 V/Y
Jmenovitý proud	122 A
Jmenovitý kmitočet	238 Hz
Účinnost	89,9 %
Maximální moment	2000 N.m
Maximální proud	368 A
Maximální otáčky	1000 min <sup>-1</sup>
Počet pólů	44

Tabulka 5.4 Technické parametry synchronního motoru

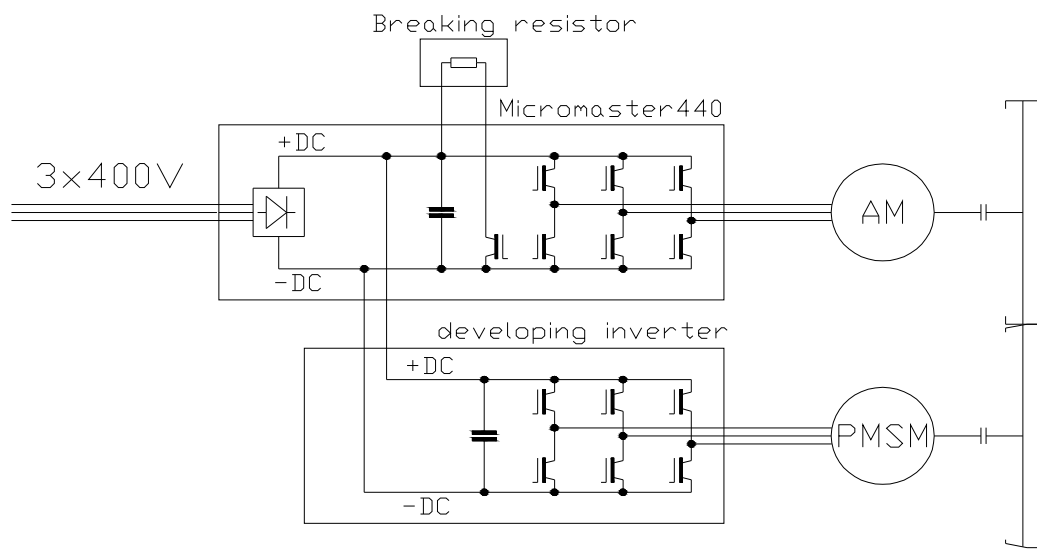
Součástí standu je i asynchronní motor spojený přes spojku, plnící funkci zátěžového motoru při zátěžových zkouškách. Jedná se o typ MAF 315S - 10 zkonstruovaný v MEZ Brno a napájený ze spínacího měniče MICROMASTER 440 od firmy Siemens. Na motoru je umístěn měřič otáček dávající zpětnou informaci napájecí měnič. Dále byl k motoru přidán snímače točivého momentu s rozsahem ± 2000 N.m, umístěný mezi motorem a nekonečnou kolejí. Technické parametry asynchronního motoru jsou v tabulce 5.5.

<b>TECHNCKÉ PARAMETRY</b>	
Jmenovitý výkon	55 kW
Jmenovité otáčky	589 min <sup>-1</sup>
Jmenovité napětí	3 x 380 V / Δ
Jmenovitý proud	133 A
Počet pólů	10

Tabulka 5.5 Technické parametry 3f asynchronního motoru

Měnič pro napájení PMSM byl vyvinut na Dopravní Fakultě Univerzity Pardubice, skládající se z tří dvojitých tranzistorových IGBT jednotek SEMIKRON pro proud do 400 A (25°C) a do 600 A pro špičkový proud. Tento měnič umožňuje provádět zkoušky řízení jak při nominálním zatížení, tak i při přetížení (maximální

proud motoru PMSM je 368 A. Dále obsahuje velkokapacitní kondenzátory (9 jednotek po 4700  $\mu\text{F}$  / 400 V) reprezentující vstupní obvod a tři budiče [20], [21].



Obr.5.8 Diagram struktury měničů

### 5.3 Analýza měření EMI

Měření zkoušeného zařízení stand proběhlo přímo na pracovišti, kde je zařízení trvale umístěno. Při měření jsem použil měřící zařízení, jež jsou popsány v předchozí kapitole. Celé měření bylo provedeno pouze sondou HZ 530 - E pro měření elektrické složky elektromagnetického pole, jelikož sondy HZ 530 - M a HZ 530 - H během měření nezaznamenaly žádné hodnoty. Sonda HZ 530 - E byla nasměrována na předpokládaný největší zdroj rušivých signálů, tedy na měnič pro PMSM, jak zobrazuje obr.5.1. Vzhledem k zadání práce a použitých měřících zařízení, bylo měření provedeno v frekvenčním rozsahu 100 kHz – 1 GHz pro tři různé pracovní režimy chodu zařízení. Za účelem dobrého zobrazení naměřených hodnot, bylo vyhodnocení provedeno v pásmu 100 kHz – 1 GHz a 100 kHz – 10 MHz. K zpracování naměřených hodnot a vytvoření výsledných grafů byl použit program Microsoft Excel.

### 5.3.1 Měření při nízkém výkonu

Před zahájením měření byl nejprve zvolen požadovaný výkon PMSM, nastavením hodnot daných veličin uvedených v tabulce 5.6.

měníč Siemens	PMSM
6,7 Hz	$I_{ef} = 6,12 \text{ A (4,2 \%)}$
	$n = 17,364 \text{ ot/sek}$
	$U_{DC} = 559 \text{ V}$
	$P_{ef} = 560,6 \text{ W}$

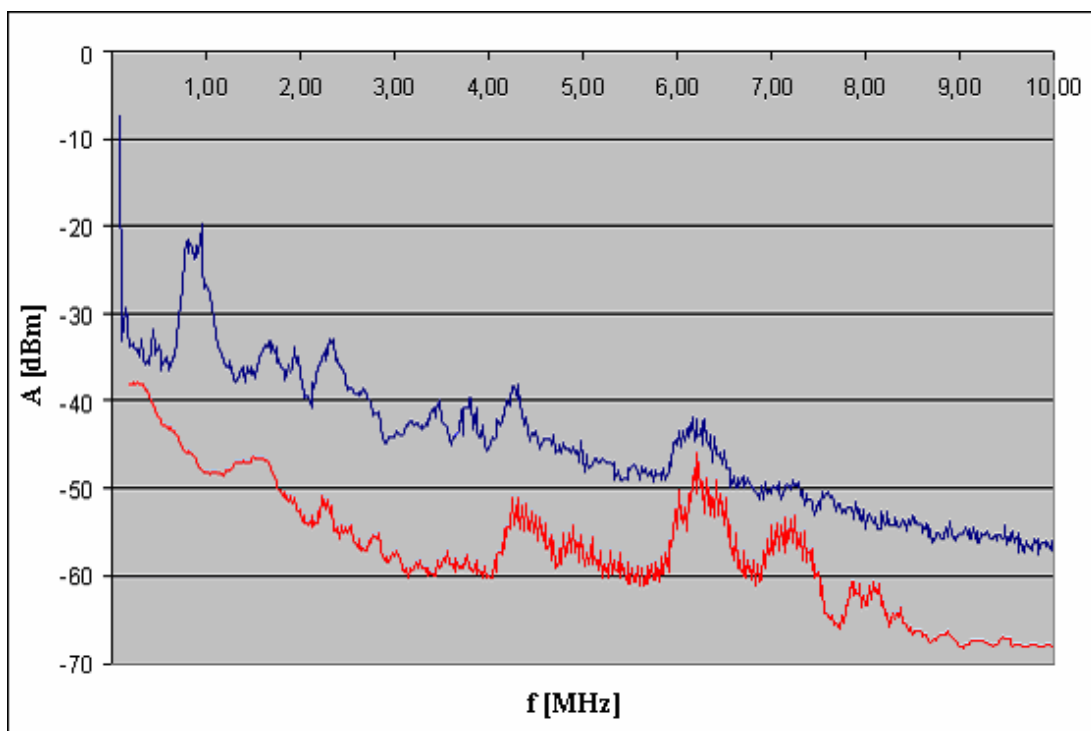
$I_{ef}$  - efektivní hodnotu proudu motoru;  
 $n$  - počet otáček motoru;  
 $U_{DC}$  - ss napětí na meziobvodu měniče;  
 $P_{ef}$  - efektivní hodnota výkonu motoru;

Tabulka 5.6 Parametry nastavení motoru

Pro měření v pásmu 100 kHz – 1 GHz (100 kHz – 10 MHz), byl spektrální analyzátor nastaven na hodnoty:

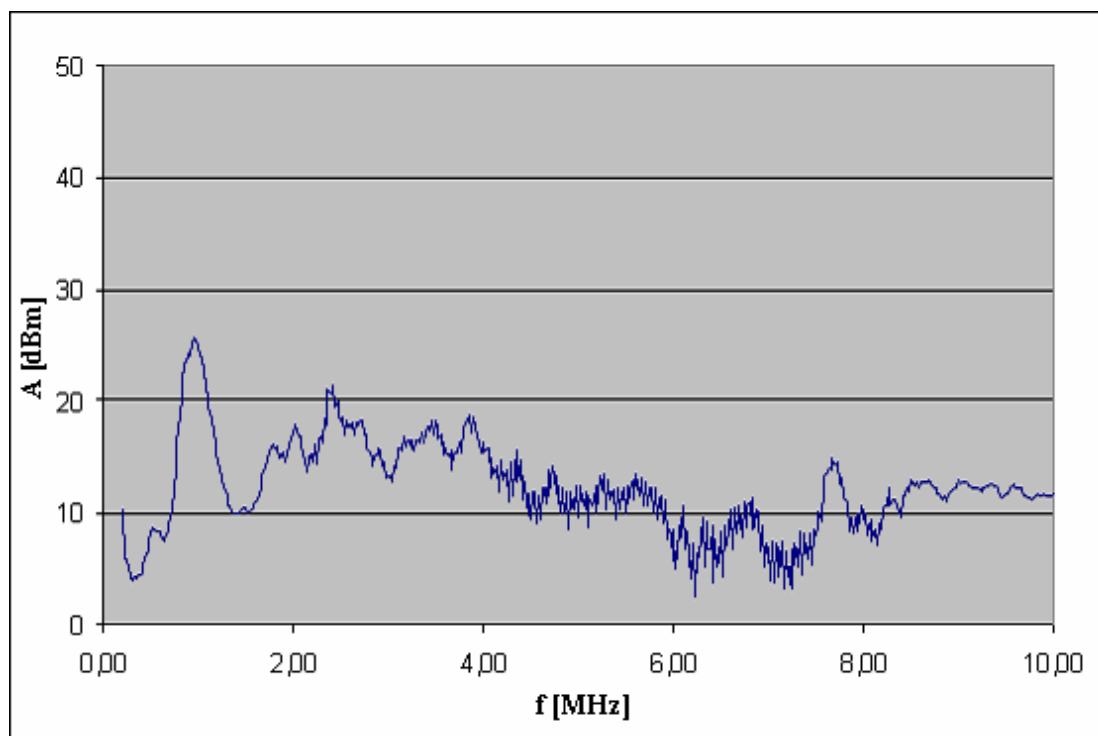
- RBW (resolution bandwidth) = 300 kHz, (10 kHz);
- VBW (video bandwidth) = 300 kHz, (10 kHz);
- SWT = 15 ms, (100 ms)

Během vlastního měření bylo naměřeno 500 hodnot s krokem 19,8 kHz. Kvůli přehlednosti není tedy vypsáno všech 500 hodnot, ale je zobrazen výsledný graf těchto hodnot měření. Graf 5.1 zobrazuje hodnoty vyzařované elektromagnetické energie v rozsahu 100 kHz až 10 MHz, naměřené pomocí sondy HZ 530 - E při zapnutém (modrá křivka) a vypnutém zařízení (červená křivka). Červená křivka zobrazuje tzv. elektromagnetické pozadí.



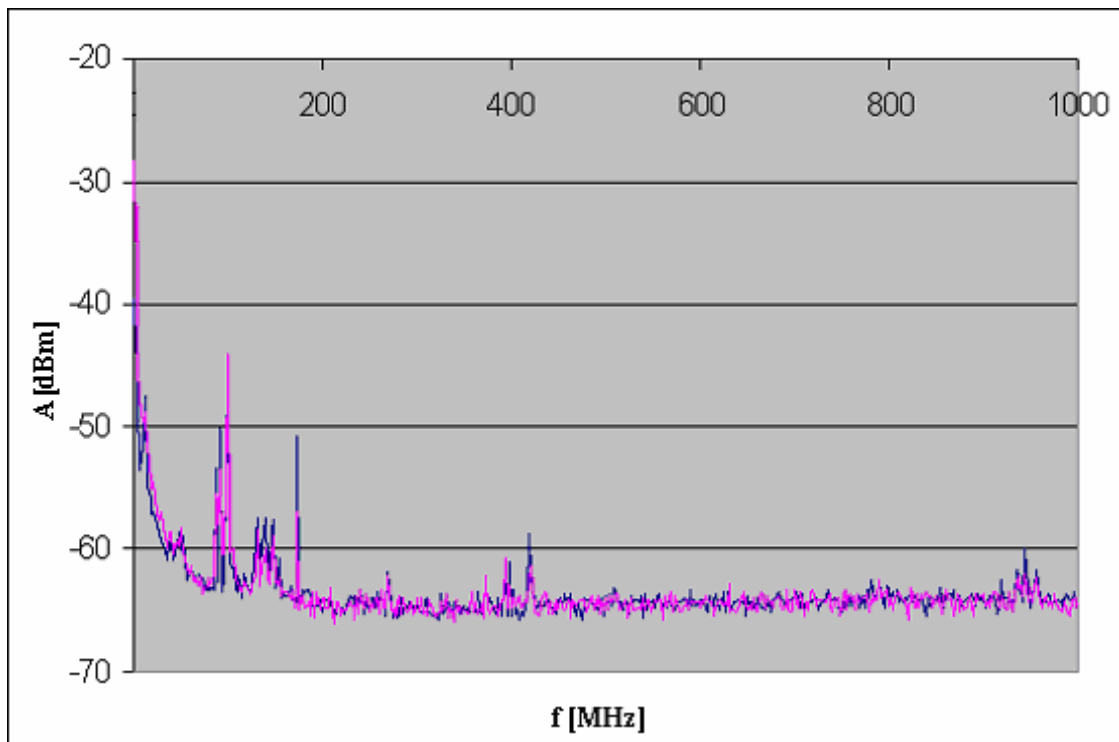
Graf 5.1 Porovnání hodnot elektromagnetické energie při zapnutém a vypnutém zařízení

Graf 5.2 zobrazuje skutečnou hodnotu vyzařované elektromagnetické energie v rozsahu 100 kHz až 10 MHz, vzniklou odečtením hodnot naměřených při zapnutém a vypnutém zařízení.



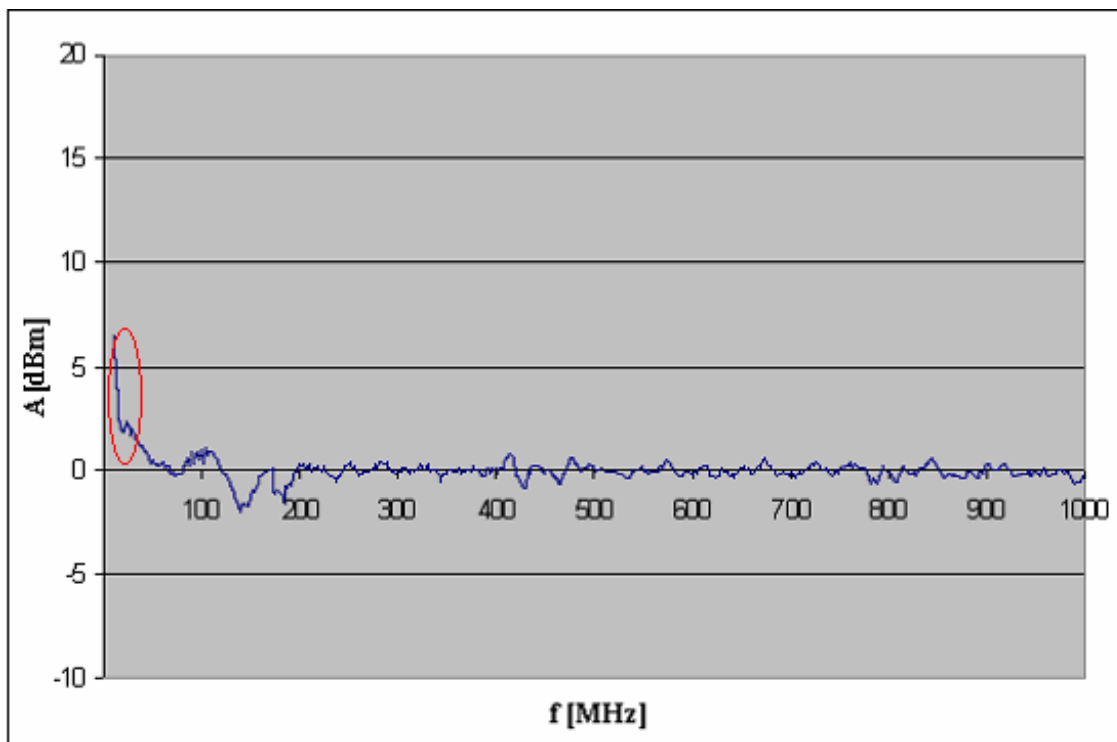
Graf 5.2 Skutečná hodnota vyzařované elektromagnetické energie

Graf 5.3 zobrazuje hodnoty vyzařované elektromagnetické energie v rozsahu 100 kHz – 1 GHz naměřené sondou HZ 530 - E při zapnutém (modrá křivka) a vypnutém zařízení (červená křivka).



Graf 5.3 Porovnání hodnot elektromagnetické energie při zapnutém a vypnutém zařízení

Graf 5.4 zobrazuje skutečnou hodnotu vyzařované elektromagnetické energie v rozmezí 100 kHz – 1 GHz, vzniklou odečtením hodnot naměřených při zapnutém a vypnutém zařízení. V grafu 5.4 je pro názornost zvýrazněná oblast předešlého měření, tedy 100 kHz – 10 MHz.



Graf 5.4 Skutečná hodnota vyžarované elektromagnetické energie

Jak je vidieť z grafu 5.3 a 5.4, naměřená hodnota vyžarované elektromagnetické energie na vysokých frekvencích je zanedbatelná (respektive naměřené hodnoty můžeme považovat za chybu měření), proto bude dále zobrazeno vyhodnocení měření pouze v rozsahu 100 kHz – 10 MHz.

### 5.3.2 Měření při zvýšeném výkonu

Nastavené hodnoty daných veličin PMSM, pro měření při zvýšeném výkonu, jsou uvedeny v tabulce 5.7.

měníč Siemens	PMSM
6,7 Hz	$I_{ef} = 97,6 \text{ A (80 \%)}$
	$n = 18,23 \text{ ot/sek}$
	$U_{DC} = 498 \text{ V}$
	$P_{ef} = 11,28 \text{ kW}$

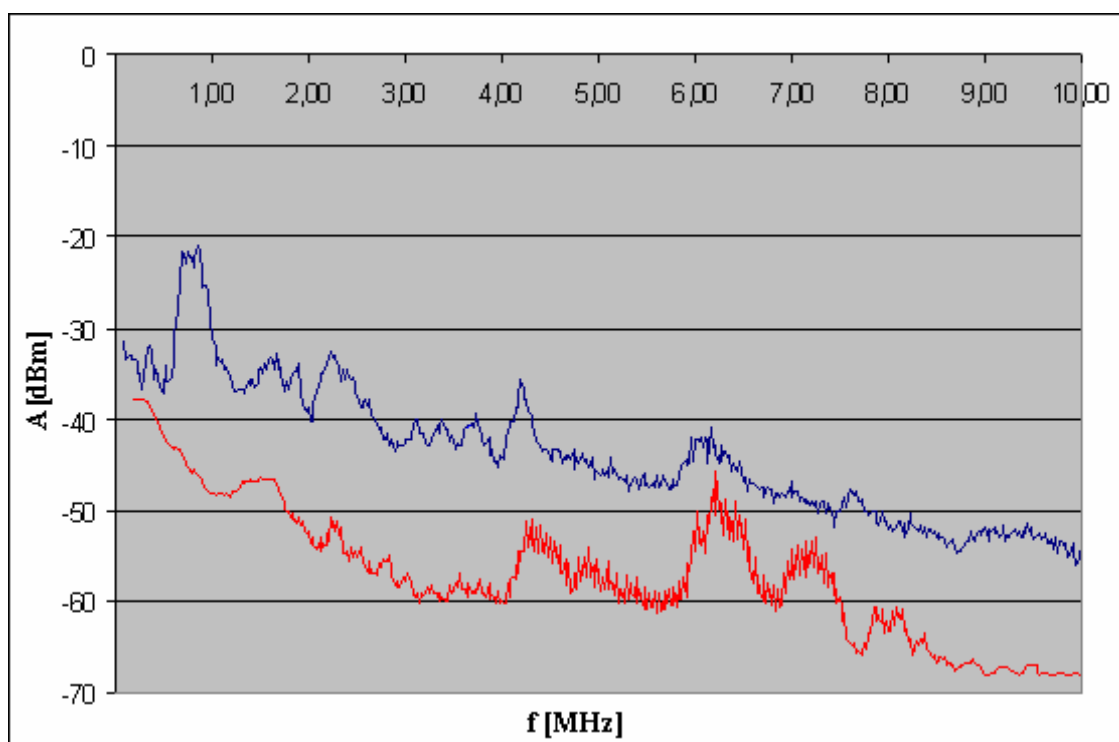
**$I_{ef}$**  - efektivní hodnotu proudu motoru;  
 **$n$**  - počet otáček motoru;  
 **$U_{DC}$**  -ss napětí na meziobvodu měniče;  
 **$P_{ef}$**  - efektivní hodnota výkonu motoru;

Tabulka 5.7 Parametry nastavení motoru

Měření bylo provedeno v rozmezí 100 kHz – 10 MHz, při nastavených hodnotách spektrálního analyzátoru:

- RBW (resolution bandwidth) = 10 kHz,
- VBW (video bandwidth)= 10 kHz,
- SWT = 100 ms,

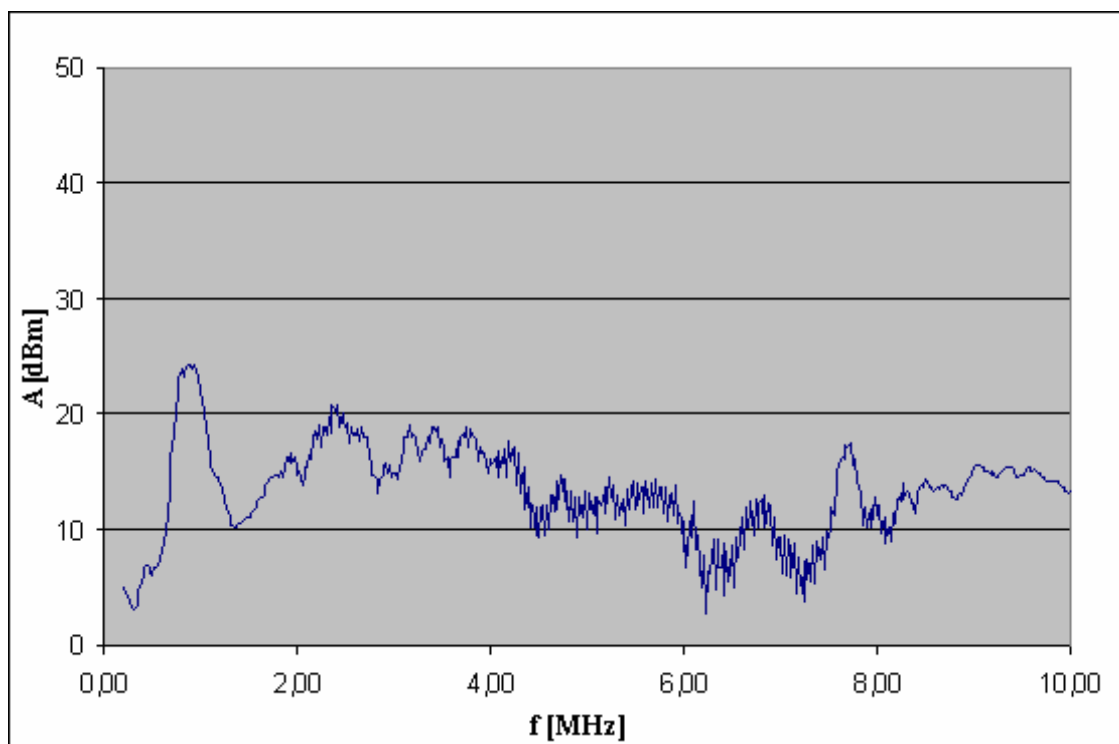
V grafu 5.5 je zobrazeny hodnoty vyzařované elektromagnetické energie, změřené pomocí sondy HZ 530 - E v rozsahu 100 kHz – 10 MHz při zapnutém (modrá křivka) a vypnutém zařízení (červená křivka). Červená křivka zobrazuje tzv. elektromagnetické pozadí.



Graf 5.5 Porovnání hodnot elektromagnetické energie při zapnutém a vypnutém zařízení

Graf 5.6 zobrazuje skutečnou hodnotu vyzařované elektromagnetické energie v rozmezí 100 kHz – 10 MHz, vzniklou odečtením hodnot naměřených při zapnutém a vypnutém zařízení.





Graf 5.6 Skutečná hodnota vyzařované elektromagnetické energie

### 5.3.3 Měření při maximálním výkonu

Nastavené hodnoty daných veličin PMSM, pro měření při maximálním výkonu zařízení, jsou uvedeny v tabulce 5.8.

měníč Siemens	PMSM
6,7 Hz	$I_{ef} = 122 \text{ A (100 \%)}$
	$n = 18,5 \text{ ot/sek}$
	$U_{DC} = 477 \text{ V}$
	$P_{ef} = 15,13 \text{ kW}$

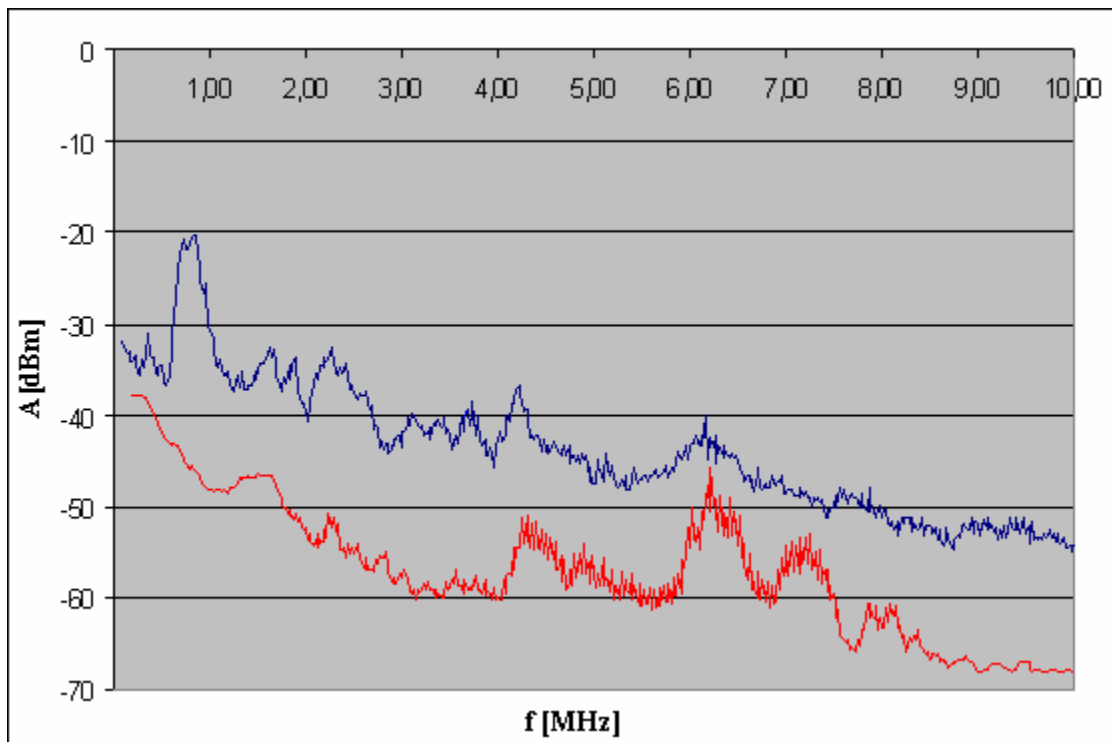
$I_{ef}$  - efektivní hodnotu proudu motoru;  
 $n$  - počet otáček motoru;  
 $U_{DC}$  -ss napětí na meziobvodu měniče;  
 $P_{ef}$  - efektivní hodnota výkonu motoru;

Tabulka 5.8 Parametry nastavení motoru

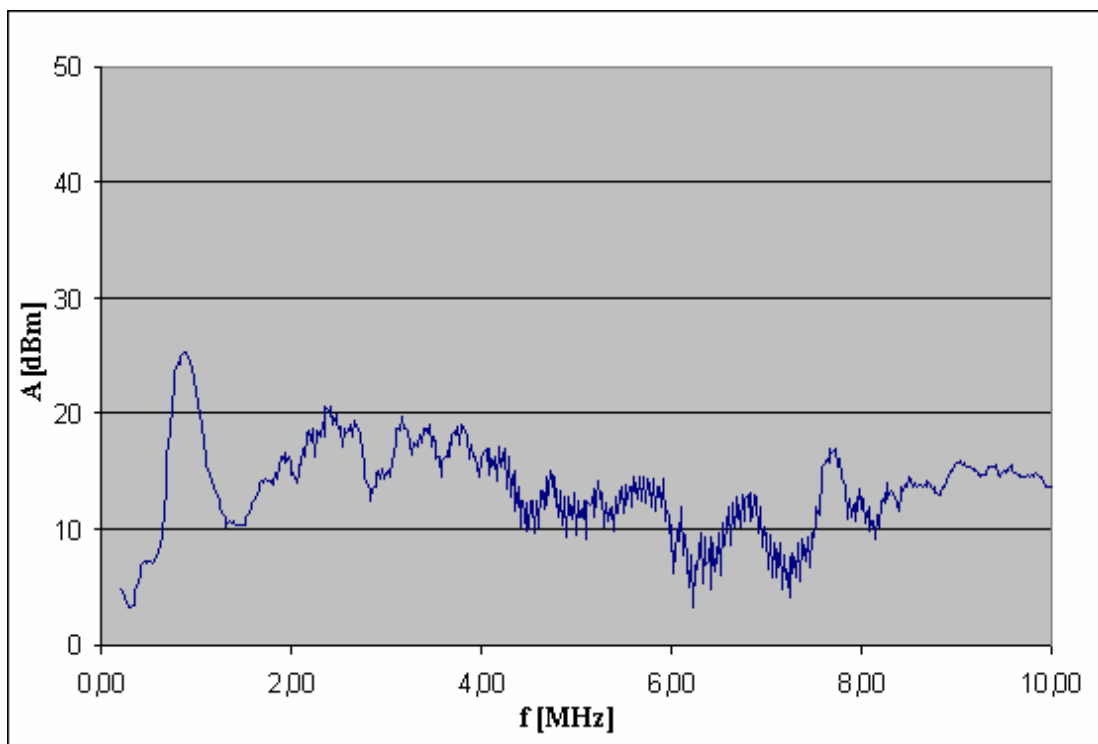
Měření bylo provedeno v rozmezí 100 kHz – 10 MHz, při nastavených hodnotách spektrálního analyzátoru:

- RBW (resolution bandwidth) = 10 kHz,
- VBW (video bandwidth) = 10 kHz,
- SWT = 100 ms.

Graf 5.7 zobrazuje porovnání naměřených hodnot vyzařované elektromagnetické energie v rozsahu 100 kHz až 10 MHz, při zapnutém (modrá křivka) a vypnutém zařízení (červená křivka).



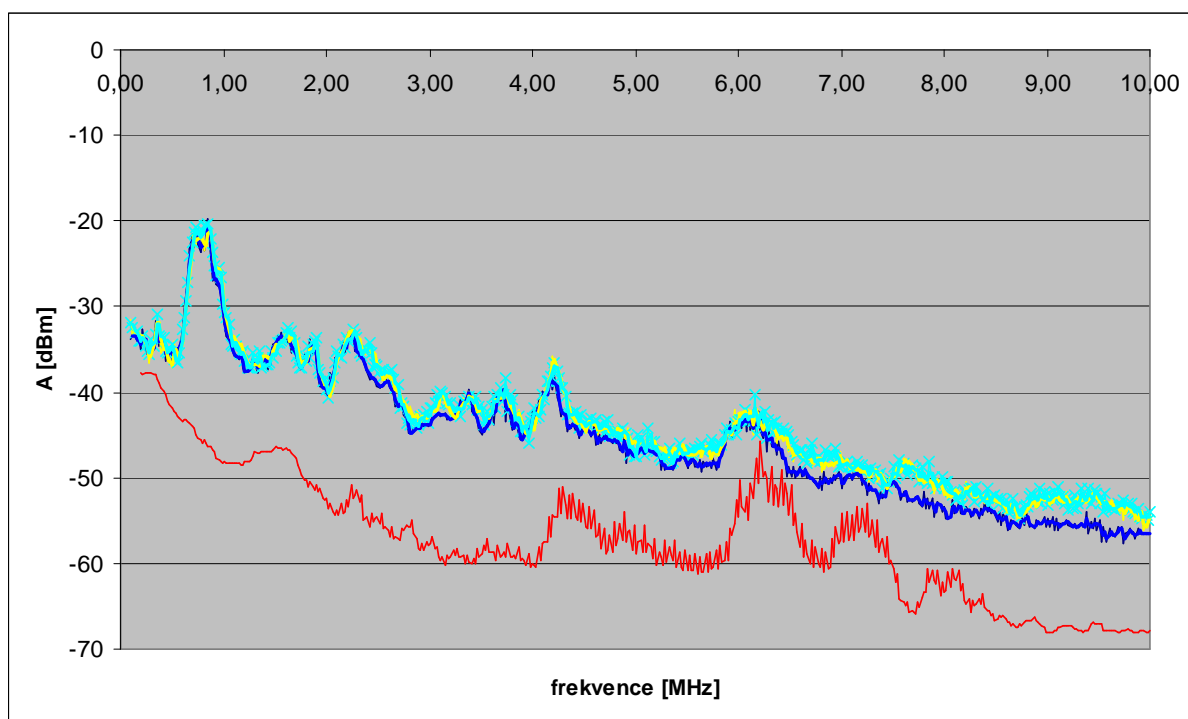
Graf 5.7 Porovnání hodnot elektromagnetické energie při zapnutém a vypnutém zařízení



Graf 5.8 Skutečná hodnota vyzařované elektromagnetické energie

Graf 5.8 zobrazuje skutečnou hodnotu vyzařované elektromagnetické energie v rozmezí 100 kHz – 10 MHz, vzniklou odečtením hodnot naměřených při zapnutém a vypnutém zařízení.

Srovnání naměřených hodnot vyzařované elektromagnetické energie v rozsahu 100 kHz – 10 MHz pro tři různé režimy chodu zařízení vzhledem k pozadí, získaných z těchto měření, je zobrazeno v grafu 5.9. Přičemž modrá barva reprezentuje měření při nízkém výkonu, žlutá barva při zvýšeném výkonu, světle zelená barva měření při maximálním výkonu a červená barva reprezentuje elektromagnetické pozadí. I když to není z grafu jednoznačně zřejmé, dochází při zvyšování výkonu motoru ke zvyšování hodnoty měničem vyzařované energie.

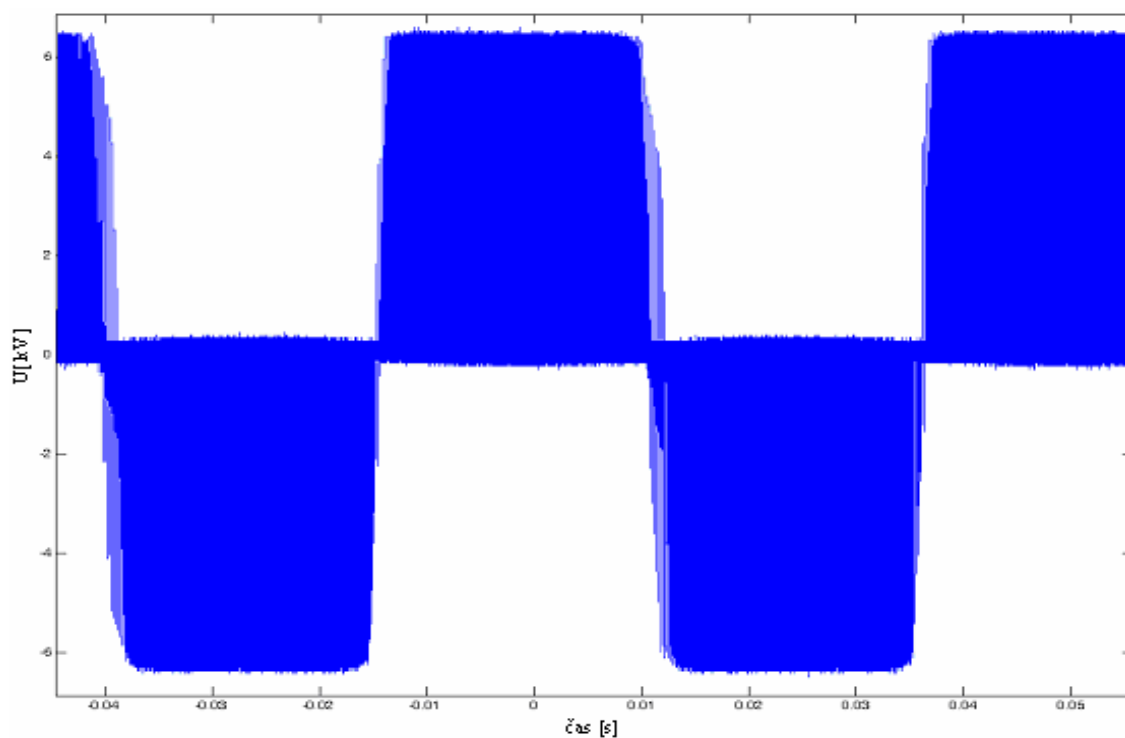


Graf 5.9 Hodnot elektromagnetické energie pro tři různé režimy chodu zařízení

### 5.3.4 Měření napět'ovou sondou

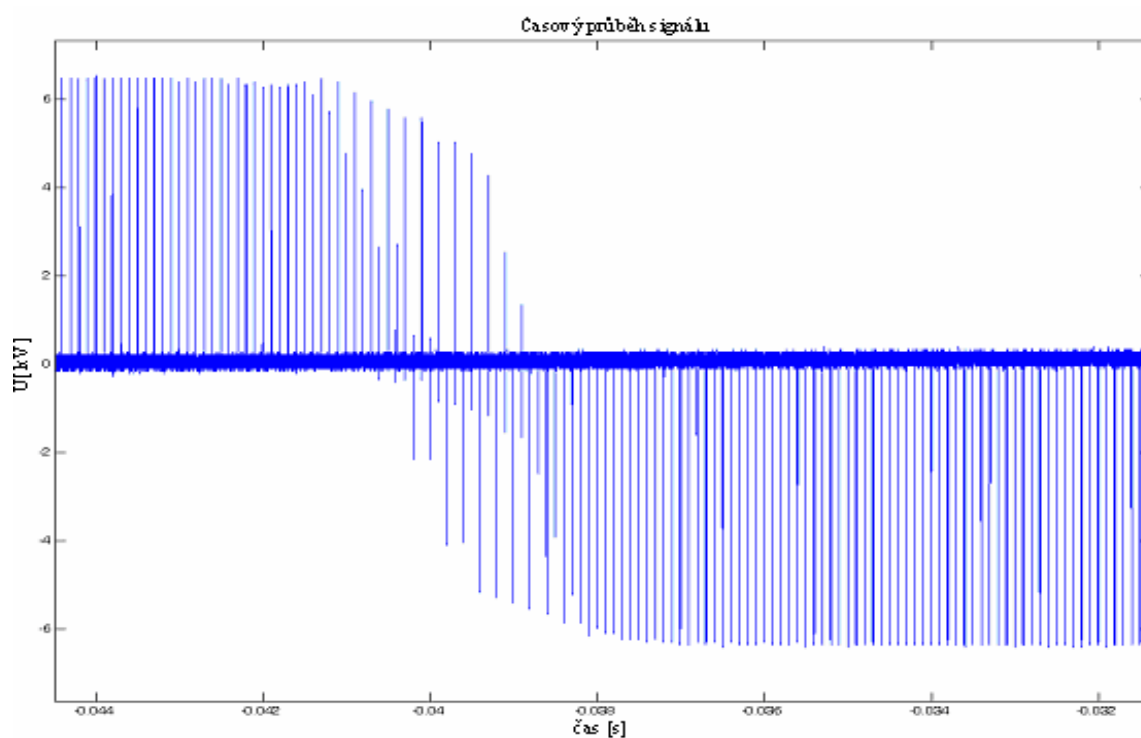
Pomocí napět'ové sondy umístěné na přípojném kabelu měniče, jsem provedl měření časového průběhu a spektra řídicích signálů měniče. K měření byl využit osciloskop Agilent MSO7104A (s možností vzorkování rychlostí až 4 GS/s) připojený přes sondu přímo ke kabelu od PMSM měniče. Měření bylo určeno ke zjištění signálů na velmi vysokých kmitočtech generovaných měničem a řídicími signály, které mohou při generování rychlých obdél'íkových pulzů vznikat. Obr.5.9 ukazuje časový průběh řídicích signálů měniče za několik period generovaného napájecího

napětí. Na obr. 5.10 je detailní pohled na řídicí signál produkovaný měničem, kde jsou vidět i jednotlivé řídicí pulzy.



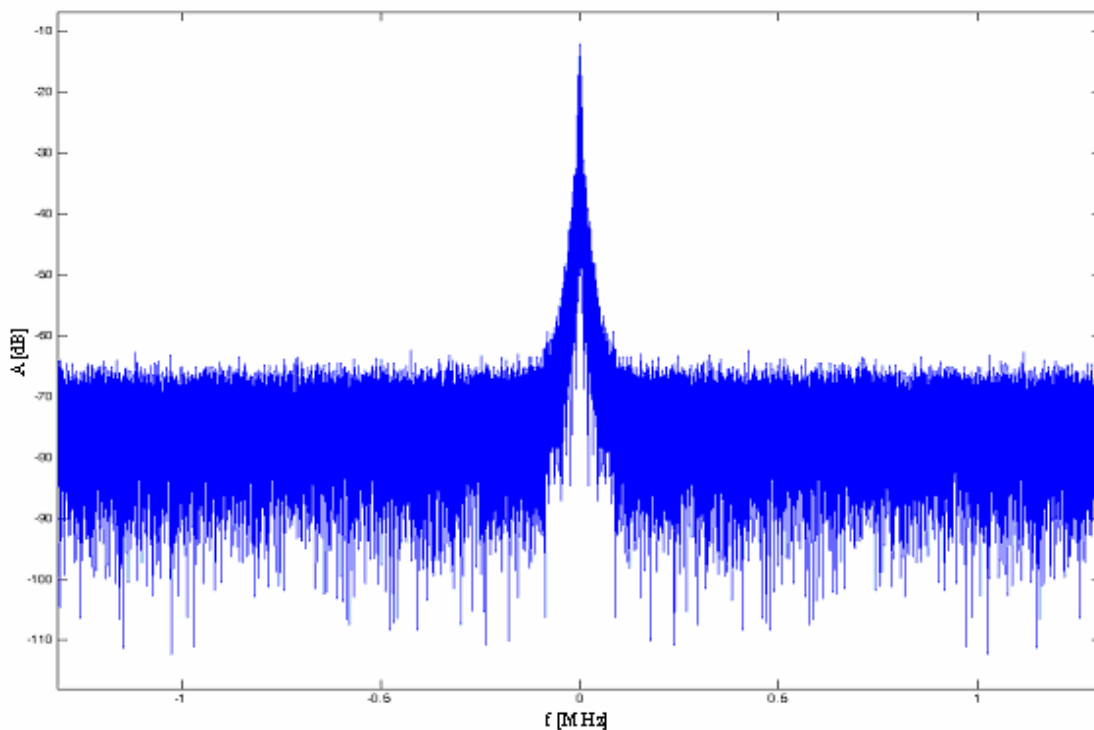
Obr.5.9 Časový průběh řídicích signálů měniče

Signál se skládá ze série pulzů vytvářených PWM modulací (Pulse Width Modulation). Jimi vytvářená první harmonická složka pak slouží k vytváření napájecího proudu.

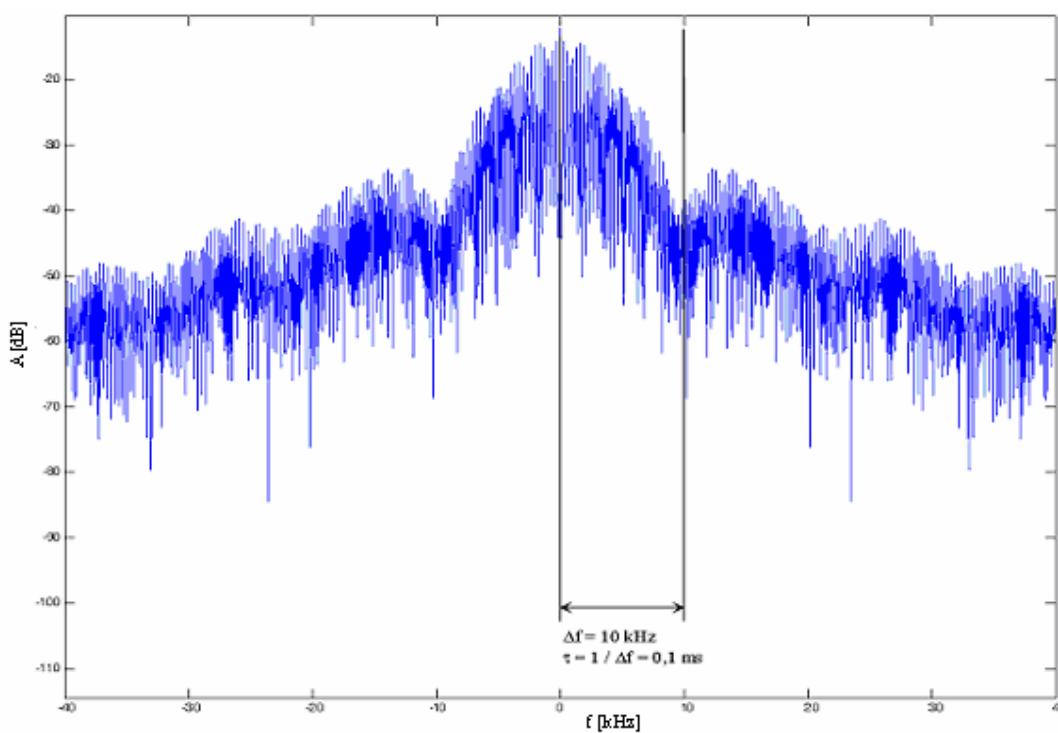


Obr.5.10 Časový průběh detailu řídicího signálu měniče

Pulzy jsou generovány s periodou 0,1 ms, což znamená kmitočet 10 kHz. Pulzy mají střídavě kladnou a zápornou polaritu. Spektrum řídicího signálu je zobrazeno na obr.5.11.



Obr.5.11 Spektrum řídicího signálu měniče



Obr.5.12 Perioda řídicího signálu

Na obr.5.12 je vyznačeno určení periody signálu. Délka periody se při předpokladu generování obdélníkových řídicích pulzů určí ze šířky prvního laloku spektra.

Z průběhu spektra řídicího signálu měniče vyplývá, že jeho průběh odpovídá klasickému tvaru spektra obdélníkového pulzu a řízení měniče tedy negeneruje signály na vyšších kmitočtech. V důsledku tedy nebude docházet k ovlivňování jiných zařízení pracujících ve vyšších frekvenčních pásmech.

## ZÁVĚR

Veškeré elektrické a elektronické systémy či zařízení při své činnosti více či méně produkují elektromagnetické vlnění (signály). Toto vlnění souvisí s přenosem energie a využívá se např. k přenosu informací a dat. Tomuto vlnění či signálům říkáme funkční signály (rádiové, televizní, telefonní), jelikož slouží k funkční činnosti určitého systému či zařízení. Tyto signály však mohou být zachyceny i jinými okolními zařízeními, jež k příjmu těchto signálů nejsou primárně určeny, a mohou v nich způsobit nežádoucí chování, tzv. rušení. Tomuto rušení pak říkáme funkční rušení. Kromě funkčního rušení, existuje i tzv. nefunkční rušení. Jedná se o parazitní rušivé signály, které nejsou funkční součástí určitého zařízení, nýbrž vznikají jako vedlejší nežádoucí efekt, při jeho činnosti. Rušivé signály se dají rozdělit i podle jiných kritérií, ale všechny mají jedno společné, a to že se jedná o tzv. umělé rušivé signály, vznikající a související s činností člověka. Tyto rušivé signály, oproti tzv. přírodním rušivým signálům (které bereme pouze v potaz), se snažíme omezovat. Při současném velkém množství různých technologií, využívajících elektromagnetické vlnění k přenosu energie v jakékoliv podobě, je k zamezení současného i budoucího nekontrolovatelného růstu případů vzájemného rušení, nezbytně nutné dodržování daných EMC norem, stanovujících mimo jiné i hodnoty přípustného elektromagnetického vyzařování.

Další neméně důležitá otázka, související s existencí nepřírozené elektromagnetické energie vytvořené člověkem, vyskytující se v našem životním prostředí, je otázka negativního vlivu této elektromagnetické energie na lidské zdraví. Vlivy vysokovýkonových a vysokofrekvenčních hodnot elektromagnetických polí na lidské zdraví jsou známy a dobře popsány, což je respektováno i příslušnými hygienickými normami. Názory na možný negativní vliv dlouhodobého působení nízkofrekvenčních elektromagnetických polí o nízkých hodnotách výkonu, běžně se vyskytujících např. v našich domácnostech, na lidské zdraví jsou nejednotné. Nicméně jejich negativní vliv na lidské zdraví nebyl zatím vědecky ověřen.

K zjištění možného generování elektromagnetických signálů konkrétním technickým zařízením, schopným způsobit rušení u sdělovacích a/nebo telekomunikačních zařízení, bylo provedeno zkušební měření na testovacím zařízení STAND, umístěném v laboratoři Dopravní fakulty Jana Pernera

Univerzity Pardubice. Toto zařízení slouží k ověřování vlastností a možností synchronní motoru s permanentními magnety pro elektrickou trakci. Ačkoliv místo měření ani použítá měřicí zařízení nesplňovaly podmínky pro certifikované EMC měření, lze z dosažených výsledků konstatovat, že i při maximální povolené hodnotě výkonu měřeného zařízení nebude docházet k ovlivňování jiných zařízení pracujících ve vyšších frekvenčních pásmech, jako jsou např. telekomunikační a sdělovací zařízení.



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1.1 Elektromagnetická vlna v jediném okamžiku.....	17
Obr.1.2 Spektrum elektromagnetických vln.....	18
Obr.2.1 Základní řetězec EMC.....	22
Obr.2.2 Základní oblasti EMC.....	25
Obr.2.3 Způsoby šíření elektromagnetické energie.....	28
Obr.2.4 Druhy elektromagnetických vazeb.....	30
Obr.3.1 Způsoby měření rušivých signálů.....	39
Obr.3.2 Měřicí sondy pro blízké elektrické (a) a magnetické pole (b).....	43
Obr.3.3 Rozdělení oblastí elektromagnetického pole podle vzdálenosti od zdroje...	45
Obr.5.1 Schéma měřicího pracoviště.....	58
Obr.5.2 Spektrální analyzátor R&S FLS 3.....	59
Obr.5.3 Sada sond pro indikaci blízkého pole HZ 530.....	60
Obr.5.4 Napěťová sonda HV 250.....	61
Obr.5.5 Zkušební zařízení stand.....	63
Obr.5.6 Detailní pohled na PMSM.....	63
Obr.5.7 Měnič Micromaster a Siemens.....	63
Obr.5.8 Diagram struktury měničů.....	65
Obr.5.9 Časový průběh řídicích signálů měniče.....	74
Obr.5.10 Časový průběh detailu řídicího signálu měniče.....	74
Obr.5.11 Spektrum řídicího signálu měniče.....	75
Obr.5.12 Perioda řídicího signálu.....	75

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 5.1 Porovnání hodnot elektromagnetické energie při zapnutém a vypnutém zařízení.....	67
Graf 5.2 Skutečná hodnota vyzařované elektromagnetické energie.....	67
Graf 5.3 Porovnání hodnot elektromagnetické energie při zapnutém a vypnutém zařízení.....	68
Graf 5.4 Skutečná hodnota vyzařované elektromagnetické energie.....	69
Graf 5.5 Porovnání hodnot elektromagnetické energie při zapnutém a vypnutém zařízení.....	70
Graf 5.6 Skutečná hodnota vyzařované elektromagnetické energie.....	71
Graf 5.7 Porovnání hodnot elektromagnetické energie při zapnutém a vypnutém zařízení.....	72
Graf 5.8 Skutečná hodnota vyzařované elektromagnetické energie.....	72
Graf 5.9 Hodnot elektromagnetické energie pro tři různé režimy chodu zařízení.....	73

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1 Seznam nejčastěji používaný měřících antén.....	40
Tabulka 4.1 Referenční úrovně intenzity elektrického pole E.....	54
Tabulka 4.2 Referenční úrovně magnetické indukce B.....	55
Tabulka 5.1 Technické parametry spektrálního analyzátoru.....	59
Tabulka 5.2 Technické parametry sady sond HZ 530.....	61
Tabulka 5.3 Technické parametry napěťové sondy HV 250.....	62
Tabulka 5.4 Technické parametry synchronního motoru.....	64
Tabulka 5.5 Technické parametry 3f asynchronního motoru.....	64
Tabulka 5.6 Parametry nastavení motoru.....	66
Tabulka 5.7 Parametry nastavení motoru.....	69
Tabulka 5.8 Parametry nastavení motoru.....	71

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] <http://k313.feld.cvut.cz/emc/>
- [2] <http://www.urel.feec.vutbr.cz/EncyklopedieEMC/index.php?soubor=www.htm>
- [3] MYSLÍK, Jiří, Elektromagnetické pole - základy teorie, naklad. BEN – technická literatura, Praha 1998,
- [4] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Maxwellovy\\_rovnice](http://cs.wikipedia.org/wiki/Maxwellovy_rovnice)
- [5] SVAČINA J.: Elektromagnetická kompatibilita - Principy a metody, VUT Brno, 2001, ISBN 80-214-1873-7
- [6] CLAYTON R. PAUL: ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, Wiley Interscience, Canada, 2006, ISBN-13: 978-0-471-75500-5
- [7] HLAVA K.: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení, Univerzita Pardubice, 2004, ISBN 80-7194-637-0
- [8] [http://automa.hjc.cz/index.php?id\\_document=30991](http://automa.hjc.cz/index.php?id_document=30991)
- [9] Nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením
- [10] <http://elektro.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3109>
- [11] DRAGAN POLJAK: Advanced Modeling in Computational Electromagnetic Kompatibility, WILEY-INTERSCIENCE, Canada 2007, ISBN: 978-0-470-03665
- [12] JONES L.: Electronic Instruments and Measurements, London: Prentice-Hall International (UK) Limited, 1991, ISBN 0-13-248857-4.
- [13] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=26579](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26579)
- [14] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=31498](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=31498)
- [15] [http://en.wikipedia.org/wiki/Far\\_field](http://en.wikipedia.org/wiki/Far_field)
- [16] [http://www.home.agilent.com/upload/cmc\\_upload/All/NSI-near-far.pdf](http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/NSI-near-far.pdf)
- [17] [http://www.nearfield.com/amta/amta94\\_EMI.htm](http://www.nearfield.com/amta/amta94_EMI.htm)
- [18] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=26149](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26149)
- [19] Martonová, M.: Elektrotechnika a problémy životného prostredia, Skripta katedry elektroenergetiky FEI/TU Košice, Academic press Košice 1998
- [20] ČERNÝ, O. (50%), DOLEČEK, R. (50%) Research on Testing Stand with PMSM, Scientific Papers 13 (2007), Series B, University of Pardubice, Jan Perner Transport Faculty, pp. 5-11 (7), ISSN 1211-6610.
- [21] Šimánek, J. (25%), Novák, J. (25%), Černý, O. (25%), Doleček, R. (25%) FOC and Flux Weakening for Traction Drive with Permanent Magnet Synchronous

Motor, in Proceedings IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2008, Cambridge, United Kingdom, 30 June - 2 July 2008, pp. 753 - 758 (6), CD-010294, ISBN 978-1-4244-1666-0.

- [22] VACULÍKOVÁ P., VACULÍK E. aj.: Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů, Grada Publishing, Praha, 1998
- [23] CHATTERTON P. A., HOULDEN M. A.: EMC Electromagnetic Tutory to practical Design, John Wiley & Sons, New York, 1991
- [24] PEREZ R.: Handbook of Electromagnetic compatibility, Academic Press, California, 1995, ISBN 0-120550710-0
- [25] CLYDE F. COOMBS J. Electronic Instrument Handbook, New York: McGraw-Hill, 1995, ISBN 0-07-012616-X
- [26] SVOBODA, J. aj.: Základy elektromagnetické kompatibility, skripta FEL ČVUT, Praha, 1993