

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Fakulta elektrotechnická
Západočeská univerzita v Plzni

BC. LUKÁŠ KOUDELA

SIMULACE ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2011

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš KOUDELA**
Osobní číslo: **E09N0185P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Simulace šíření elektromagnetických vln**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. V souvislosti s elektromagnetickou kompatibilitou v elektrické trakci prostudujte aktuální normy a odbornou literaturu.
2. Proveďte teoretický rozbor problematiky elektromagnetické kompatibility v elektrické trakci.
3. Popište princip šíření elektromagnetických vln prostorem, chování elektromagnetických vln na rozhraní dvou prostředí, ve vrstveném prostředí, ve vlnovodných strukturách a dutinových rezonátorech.
4. S využitím knihovny Hermes2D (www.hpfem.org) naprogramujte simulace šíření elektromagnetických vln.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

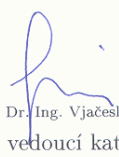
1. Novotný, K.: Elektromagnetické pole a vlny - Teorie elektromagnetického pole II, ČVUT Praha, ISBN 80-01-02429-6
2. www.hpfem.org

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Karban, Ph.D.
Katedra teoretické elektrotechniky
Konzultant diplomové práce: Ing. Roman Hamar, Ph.D.
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 18. října 2010
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2011


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2010

Anotace

Diplomová práce se zabývá principem šíření elektromagnetických vln a jejich chování v různých fyzikálních prostředích. Pojednává o problematice elektromagnetické kompatibility v elektrické trakci a uvádí související normy. Praktická část popisuje realizaci softwarové aplikace pro simulaci s využitím knihovny Hermes2D.

Klíčová slova

EMC, elektrická trakce, programovací jazyk C++, Qt SDK, Hermes2D, Agros2D

Annotation

The present thesis deals with the principle of electromagnetic waves propagation and their behavior in different physical environments. It discusses the issues of electromagnetic compatibility in electric traction and provides related standards. In the practical part, the realization of software application for simulation using the library Hermes2D is described.

Keywords

EMC, Electric traction, programming language C++, Qt SDK, Hermes2D, Agros2D

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, byl využit podle pravidel stanovených autorem.

V Plzni, dne 23. dubna 2011

.....

Bc. Lukáš Koudela

Poděkování

Na tomto místě bych rád vyjádřit poděkování vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Karbanovi, Ph.D., a konzultantu Ing. Romanu Hamarovi, Ph.D., za veškeré cenné rady, konstruktivní připomínky, čas a ochotu, který mi při řešení problémů spojených s touto prací věnovali.

Také bych touto cestou chtěl poděkovat svým rodičům a přítelkyni Stanislavě Mlsnové za veškerou jejich nedocenitelnou podporu během studia. Bez jejich pomoci by tato práce nikdy nevznikla.

V Plzni, dne 23. dubna 2011

.....

Bc. Lukáš Koudela

1	Úvod	1
2	Cíle práce	2
3	EMC v elektrické trakci	3
3.1	Souvislost EMC a elektrické trakce	3
3.2	Struktura norem EMC	4
3.3	Aktuální normativy v elektrické trakci	5
3.3.1	ČSN EN 50121-1	5
3.3.2	ČSN EN 50121-2	6
3.3.3	ČSN EN 50121-3-1	7
3.3.4	ČSN EN 50121-3-2	7
3.3.5	ČSN EN 50121-4	9
3.3.6	ČSN EN 50121-5	9
4	Elektromagnetické vlny	11
4.1	Šíření ve volném prostředí	11
4.1.1	Obecná vlnová rovnice	11
4.1.2	Harmonické pole	12
4.1.3	Rovinná vlna	12
4.2	Rozhraní dvou prostředí	13
4.3	Vrstvené prostředí	14
4.4	Vlnovody	15
4.4.1	Klasifikace vln	15
4.4.2	Kritická frekvence	15
4.5	Dutinové rezonátory	16
5	Simulace	17
5.1	Předpoklady simulace	17
5.2	Metoda konečných prvků	18
6	Závěr	19
A	Odvození vlnových rovnic.	23
B	Obsah přiloženého CD-ROM	26

1

Úvod

V posledních desetiletích se při vývoji nových zařízení nehledí jen na to, aby daný výrobek plnil svoji primární funkci, pro kterou byl navržen, ale předmětem zájmu jsou také ostatní provozní vlastnosti. Mezi nejvýznamnější se řadí činnost bez vytváření nepřijatelné úrovně elektromagnetického rušení a schopnost bezchybného fungování v definovaném prostředí. Vědecká disciplína, která se danou problematikou podrobněji zabývá je označována pojmem elektromagnetická kompatibilita (z anglického „Electromagnetic Compatibility“, označované zkratkou EMC). Významnost tohoto specifického oboru narostla i díky rozvoji a rozšíření elektrotechniky, zvláště pak číslicové mikropočítačové elektroniky.

Oblasti, ve kterých se šíření elektromagnetického pole může negativně projevovat je celá řada, od poměrně jednoduchých zapojení přes složitější analogové nebo digitální obvody až po komplexní procesorové systémy. EMC je v této práci zaměřena na obor elektrické trakce, neboť v tomto segmentu dochází k častému prolínání řady systémů různých výkonů, topologií i principů činnosti. Nutno podotknout, že vliv elektromagnetických vln musí být vždy negativní. V řadě aplikací představují vůbec základní element fungování. Typickým příkladem je oblast komunikací, ať už se jedná o využití radiových vln v radiotechnice nebo při konkrétní konstrukci používaných zařízení, typicky např. vlnovodů, rezonátorů.

Problematika elektromagnetické kompatibility zařízení velmi široce souvisí s návrhem a konstrukcí. Především již ve fázi návrhu zařízení se uvažuje nad tím, v jakém prostředí bude používán. V řadě aplikací ale není možné, nejčastěji z provozních hledisek, provádět funkční zkoušky prototypů v konkrétním prostředí. Nejen z tohoto důvodu narůstá význam simulačních aplikací, díky kterým je možné předem nasimulovat např. schopnost použitého stínění nebo účinnost navržené antény. Mezi další přínosy může přirozeně patřit urychlení vývoje nebo snížení nákladů na výrobu. Právě tvorba aplikace pro možnost simulace elektromagnetického pole je ústředním tématem této diplomové práce. Konkrétněji o tom pojednává kapitola 2.

Práce je složena z několika kapitol. Kapitola 2 vytyčuje konkrétní cíle, které tato práce hodlá splnit, kapitola 3 se zabývá problematikou EMC v konkrétním technickém oboru, v elektrické trakci. V další kapitole 4 je rozebrán matematický popis elektromagnetických vln a popsáno jejich chování v různých fyzikálních prostředích. Návrhem aplikace pro simulace šíření elektromagnetických vln se zabývá kapitola 5. V závěrečné kapitole 6 jsou shrnuty dosažené poznatky a popsány výsledky práce. V příloze A se nachází podrobné odvození vlnových rovnic elektromagnetického pole. Příloha B zahrnuje obsah přiloženého CD-ROM.

2

Cíle práce

Vznik tématu této diplomové práce souvisí s vývojem aplikace Agros2d na Katedře teoretické elektrotechniky Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Tento univerzální multiplatformní program distribuovaný pod GNU/GPL licencí slouží k řešení fyzikálních polí. Umožňuje simulaci elektrostatického, elektrického proudového, magnetického nebo teplotního pole. Hlavním přínosem v rámci diplomové práce bude s využitím knihovny Hermes2D doplnění dalšího fyzikálního pole, které bude zobrazovat chování elektromagnetického pole popsané vlnovými rovnicemi. Práce si tedy klade za cíl především doplnit vyvíjenou aplikaci o další modul, čímž by rozšířila možnosti jeho použití do dalších technických oborů.

Dalším účelem je nasimulovat vybrané vlnové problémy pro účely výuky předmětu KTE/EV. Jedná se o příklady, šíření elektromagnetických vln na dipólu, na rozhraní dvou prostředí, ve vrstveném prostředí, ve vlnovodných strukturách a v dutinových rezonátorech.

3

EMC v elektrické trakci

3.1 Souvislost EMC a elektrické trakce

Elektrická trakce je velmi specifickou oblastí. Problematika elektromagnetické kompatibility je zde tak obsáhlá, neboť se týká nejen situace ohraničené prostorem vlakových souprav, ale i dalších propojených oblastí. Prolínají se tady elektrické systémy velice vysokých výkonů, nelineární výkonové elektronické prvky i systémy dopravní signalizační a zabezpečovací. Mezi konkrétní odlišnosti u drážních zařízení patří například:

- topologie trakčního vedení (jednostranně nebo maximálně oboustranně napájené)
- lokomotiva představuje jednofázovou zátěž o značném výkonu v řádech MW ¹
- proměnná vzdálenost mezi napájecí stanicí a místem odběru (s tím související variabilita parametrů vedení)

Dle [3] je na problematiku EMC v elektrické trakci nahlíženo komplexně a rozděluje se dle kmitočtových pásem na 2 oblasti:

Nízkofrekvenční rušení - frekvenční pásmo 0 až 2500 Hz

Zdroje rušení představují především polovodičové měniče. Ty během své činnosti vytvářejí vyšší harmonické proudy. Vzhledem k rozsahu provozovaných výkonů se jedná o nezanedbatelnou složku v trakčním napájecím vedení. Důsledkem tohoto typu rušení je zvýšení odběru jalového a deformačního výkonu, čímž dochází k souvisejícímu zhoršení celkového účinníku λ (často označovaný jako „power factor“). Vliv vyšších harmonických nelze nikdy úplně odstranit, ale lze snížit jejich účinky. To se týká především omezením velikostí proudů konstrukcí měničů, metodami řízení, doplňkovou výbavou či dalšími kompenzačními zařízeními a filtry. O daných prostředcích blíže pojednává [4].

Vysokofrekvenční a impulsní rušení - frekvenční pásmo 9 kHz až 1 GHz

V této kmitočtové oblasti jsou předmětem zájmu impulsy, které vznikají při spínacích pochodech v napájecích stanicích, případně i v lokomotivách. Zdroje tohoto rušení mohou nepříznivě až kriticky ovlivňovat kromě všech drážních zařízení také blízké okolí rozvodů trakčního vedení. Mezi obzvláště citlivé spotřebiče na rušivé vlivy od elektromagnetického pole lze považovat zařízení komunikací, sdělovací systémy a veškerá řídicí technika, realizovaná v dnešní době procesorovou a číslicovou elektronikou. O úrovních přípustného rušení v elektrické trakci je pojednáno v příslušných normativních, které jsou popsány v podkapitole 3.3. Omezení vlivu elektromagnetického pole na dané zařízení je možné pomocí stínění, k jehož návrhu a realizaci je čato vhodné využití simulačních aplikací. Více o tom pojednává kapitola 5.

¹ např. ŠKODA 109 E disponuje jmenovitým výkonem 6400 kW

3.2 Struktura norem EMC

EMI interference, EMS susceptibilita

3.3 Aktuální normativy v elektrické trakci

Mezi aktuální normy, související s elektromagnetickou kompatibilitou v elektrické trakci, patří především České technické normy s označením ČSN EN 50121. Jedná se o překlady, které zajišťuje Český normalizační institut. Mají proto stejný statut jako oficiální verze, kterými jsou evropské normy EN 50121, vydávané Evropským výborem pro normalizaci v elektrotechnice (CENELEC).

Z řady důvodů, uvedených v podkapitole 3.1, je elektromagnetická kompatibilita vážným problémem již při konstrukci a výrobě trakčních vozidel. Proto je nutné vytvořit normy, které budou splňovat jak veškeré požadavky Směrnice elektromagnetické kompatibility EC 89/336/EEC, tak i zajišťovat spolehlivost a funkčnost vlastních drážních zařízení.

Soubor norem ČSN EN 50121, vydaný pod společným názvem Drážní zařízení – Elektromagnetická kompatibilita, je rozčleněn na šest logicky souvisejících částí. Bylo by neúčelné vypisovat veškerá specifika, tabulky a grafy, které jsou v těchto normách uvedené, proto se budu snažit zaměřit pouze na hlavní oblast zájmu, kterého se daný normativ týká. Přesnější informace je možné získat nahlédnutím do příslušného dokumentu.

Část 1: Všeobecně

Část 2: Emise celého drážního systému do vnějšího prostředí

Část 3-1: Drážní vozidla – Vlak a celkové vozidlo

Část 3-2: Drážní vozidla – Zařízení

Část 4: Emise a odolnost zabezpečovacích a sdělovacích zařízení

Část 5: Emise a odolnost pevných instalací a zařízení trakční napájecí soustavy

3.3.1 ČSN EN 50121-1

Norma ČSN EN 50121-1: Všeobecně popisuje rozdělení celého vlastního souboru norem, jak je uvedeno výše. Dále obsahuje postupy pro řízení managementu pro dosažení EMC v elektrické trakci. Nakonec především stanovuje funkční kritéria, které jsou založeny na evropské normě EN 61000-6-2. S jejich pomocí se posuzuje funkčnost a schopnost provozu zařízení během zkoušek EMC. V normě jsou popsána 3 funkční kritéria, označovaná jako A, B a C. Pokud testovaný vzorek není schopen splnit požadavky alespoň jednoho z uvedených kritérií, posuzuje se jako nevyhovující.

Funkční kritérium A ve většině případů nedovoluje žádnou změnu chování zařízení během i následně po skončení zkoušek EMC. Jedinou modifikací může být výrobcem nastavená minimální hranice fungování, případně přípustná mez ztráty funkčnosti, které přesto výrobek během i po testech nesmí překročit.

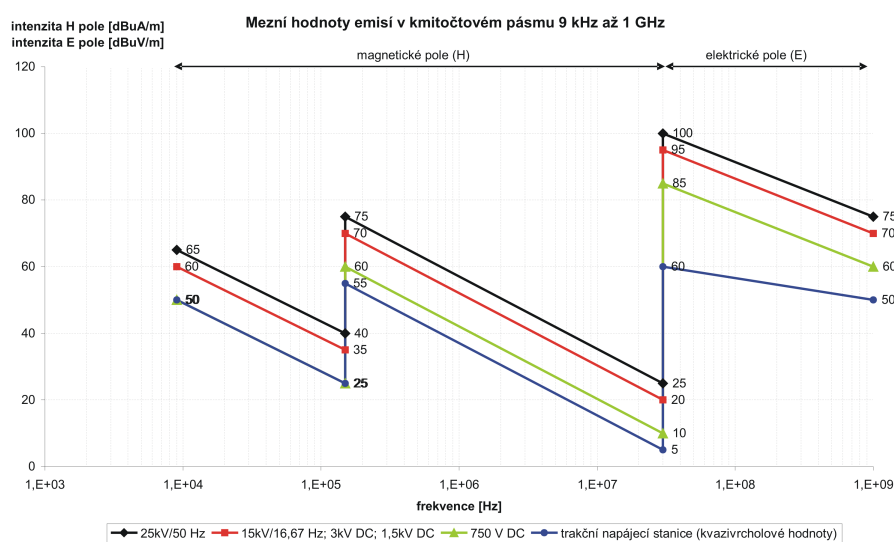
Funkční kritérium B opět nedovoluje zhoršení funkce, pokud je zařízení používáno podle svého určení, avšak pouze po ukončení zkoušek. Během testů je akceptovatelné zhoršení činnosti za předpokladu, že se nezmění současný provozní stav a nedojde ke ztrátě dat v paměti zařízení.

Funkční kritérium C popisuje, že u zkoušeného zařízení je možná dočasná ztráta funkce, pokud je nějakým prostředkem možno zajistit její obnovení.

3.3.2 ČSN EN 50121-2

Norma ČSN EN 50121 - 2: Emise celého drážního systému do vnějšího prostředí ustanovuje mezní hodnoty emisí, které mohou být produkovány při provozu drážních vozidel. Dále určuje, jakým způsobem měření lze dané hodnoty ověřit. Dle normy se předpokládá, že elektromagnetické rušení, působené elektrickou trakcí, existuje ve všech místech ve vzdálenosti 10 m od vnější elektrizované troleje nebo 10 m od trakční napájecí stanice. Proto je i stanoveno provádět měření emisí v této vzdálenosti. Pokud není možné tuto podmínku vzhledem k místním poměrům na dráze dodržet, existuje v normě definovaný přepočít pro měření v jiné ekvivalentní vzdálenosti.

Mezní hodnoty se podle normy rozlišují na vyzařování z venkovní dráhy při provozu vlaku a samostatně na emise z trakčních napájecích stanic. Hranice (velikost vrcholové hodnoty) pro jednotlivé napájecí systémy v elektrické trakci používané v České republice jsou uvedeny v grafu na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Hranice emisí jednotlivých trakčních systémů.

Vlastní měření intenzity elektromagnetického pole, generovaného drážními vozidly, se provádí detektorem vrcholové hodnoty ve vzdálenosti 10 m od osy koleje. Určuje se horizontální magnetická složka pole (kolmá k trati). U elektrické složky vyzařovaného pole se měří složka vertikální a horizontální (rovnoběžná s tratí). Normou definované šířky pásma pro pokles měřené veličiny o 6 dB a použité měřicí zařízení pro pokrytí celého kmitočtového pásma jsou uvedeny v následující tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Přehled měřených frekvenčních rozsahů a měřících antén.

Kmitočtový rozsah	Pásmo	Měřicí anténa	Měřená veličina
9 kHz - 150 kHz	200 Hz	smyčková nebo rámová	magnetická intenzita H
150 kHz - 30 MHz	9 kHz	smyčková nebo rámová	magnetická intenzita H
30 MHz - 300 MHz	120 kHz	bikónický dipól	elektrická intenzita E
300 MHz - 1 GHz	120 kHz	logaritmicko - periodická	elektrická intenzita E

3.3.3 ČSN EN 50121-3-1

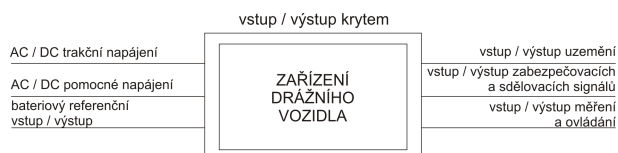
Další platnou normou souboru Drážní zařízení – Elektromagnetická kompatibilita je ČSN EN 50121-3-1: Drážní vozidla – Vlak a celkové vozidlo. Týká se všech hnacích prostředků, včetně městských drah a ucelených vlakových souprav, ale rozsah platnosti této normy končí na rozhraní vozidla. Tím se rozumí buď kluzný kontakt s trolejovým vedením nebo přívodní kolejnicí, případně konektor AC nebo DC napájení u tažených vozidel. Předmětem této normy je stanovení zkušebních podmínek a mezí pro elektromagnetickou emisi a odolnost, aby tím bylo zajištěno fungování trakčního vozidla v jeho definovaném prostředí.

Zkoušky emisí jsou vykonávány při provozních stavech, při kterých se předpokládá nejvyšší produkovaná hodnota elektromagnetického rušení. Uvedené mezní hodnoty odpovídají emisím v normě ČSN EN 50121-2, které jsou uvedeny na obrázku 3.1.

Zkoušky odolnosti se neprovádějí, normou je pouze stanovena pevná hranice 20 V/m v kmitočtovém rozsahu 0,15 MHz – 2 GHz, do které se považuje vozidlo za odolné.

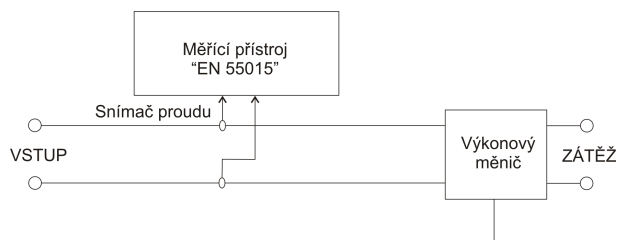
3.3.4 ČSN EN 50121-3-2

Normativ ČSN EN 50121-3-2: Drážní vozidla – Zařízení definuje elektromagnetické podmínky pro veškerá zařízení, které je možné používat na trakčním vozidle, tak aby bylo zajištěna bezproblémová činnost při všech provozních stavech. Je zde definována řada specifických požadavků. Například tato norma neplatí pro přechodné emise při vypnutí nebo zapnutí zařízení. Zvláštní požadavek platí pro prostředky radiokomunikací, pro které emise a odolnosti uvedené v této normě neplatí. Pokud se jedná o komponentu, kterou je potřeba připojit do systému vlastního vozidla, provádějí se veškeré zkoušky v zapojeném stavu. Měření se navíc provádí pro všechny příslušné vstupy a výstupy. Rozlišují se na několik druhů, hlavní jsou uvedeny na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Hlavní druhy vstupů a výstupů zařízení.

Pro veškerá měřená zařízení se určují funkční kritéria, které jsou definované v ČSN EN 50121-1, tj. A, B a C. Norma také definuje postup pro měření vysokofrekvenčního rušení přenášené po přívodním vedení v pásmu 9 kHz až 30 MHz, které je vytvářeno především napájecími měniči trakčních motorů, obecně přístrojů se spínanými zdroji. Princip zkoušky je naznačen na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Hlavní druhy vstupů a výstupů zařízení.

3.3. AKTUÁLNÍ NORMATIVY V ELEKTRICKÉ TRAKCI

Úrovně rušení se určují v řadě měřících bodů po celé délce vedení a vyhodnocují se maximální rušivé proudy. Aby měření nebylo ovlivněno trakčním proudem, je potřeba zajistit správné impedanční přizpůsobení mezi snímačem proudu a měřícím přístrojem. Meze emisí pro rušení po vedení u tohoto měření nastaveny nejsou, pokud se jedná o samostatné zařízení. Pokud je instalování v okolí jiného přístroje, musí vyhovovat mezním hodnotám vyzařování dle normy ČSN EN 50121-3-1.

Zkoušky odolnosti jsou touto normou specifikovány pro zkoušky postupného testování, v libovolném pořadí. Popis metod a odkazy na základní normy pro vstupy a výstupy krytem se nachází v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2: Popis zkoušek odolnosti pro vstupy a výstupy krytem.

Jevy prostředí	Specifikace zkoušky		Základní norma	Funkční kritérium
Vysokofrekvenční elektromagnetické pole (amplitudově modulované)	80 - 1000 MHz 20 V/m (ef.) 80% AM, 1kHz	Nemodulovaná nosná	EN 61000-4-3	A
Vysokofrekvenční elektromagnetické pole (digitální mobilní telefony)	80 - 1000 MHz 20 V/m (ef.) 80% AM, 1kHz	Nemodulovaná nosná	EN 61000-4-3	A
	1400 - 1000 MHz 10 V/m (ef.) 80% AM, 1kHz	Nemodulovaná nosná		
	2100 - 2500 MHz 5 V/m (ef.) 80% AM, 1kHz	Nemodulovaná nosná		
Elektrostatický výboj	$\pm 6\text{kV}$ $\pm 8\text{kV}$	Kontaktní výboj Vzduchový výboj	EN 61000-4-2	B

Další specifika metod uvedená tabulce 3.3 jsou definovány pro následující vstupy a výstupy:

- vztahující se k baterii (s výjimkou na výstupu zdrojů energie)
- pomocné AC napájecí I/O
- signálů a komunikací, měření a ovládání procesu
- I/O DC napájení (ČSN EN 50121-4, 5)
- I/O AC napájení (ČSN EN 50121-4, 5)
- I/O uzemněním (ČSN EN 50121-4, 5)
- I/O pro signálová vedení, datové sběrnice nezahrnuté do řízení (ČSN EN 50121-5)
- I/O pro měřicí a ovládací vedení, dlouhé sběrnice (ČSN EN 50121-5)

Tabulka 3.3: Další metody zkoušek odolnosti dle příslušné normy.

Jevy prostředí	Specifikace zkoušky		Základní norma	Funkční kritérium
Vysokofrekvenční nesymetricky	0,15 - 80 MHz 20 V (ef.) 80 % AM, 1 kHz	Nemodulovaná nosná	EN 61000-4-6	A
Rychlé přechodné jevy	5/50 μ s 5 kHz ± 2 kV (± 1 kV I/O uzemněním) (± 4 kV pro I/O AC/DC)	Tr/Tn Kmitočet opakování Vrcholová	EN 61000-4-4	A B pro I/O
Rázové impulsy	± 2 kV 42 Ω 0,5 μ F 1,2/50 μ s	Zkuš. napětí naprázdno, mezi vodiči a zemí	EN 61000-4-5	B
	± 1 kV 42 Ω 0,5 μ F 1,2/50 μ s	Zkuš. napětí naprázdno, mezi vodiči		

3.3.5 ČSN EN 50121-4

Zjišťováním emisí a odolností zabezpečovacích a sdělovacích zařízení se týká další část, tj. ČSN EN 50121-4. Tato norma se však zabývá pouze těmi přístroji, které jsou instalovány v drážním prostředí mimo těch, které jsou umístěny v trakčních vozidlech. Ty jsou pokryty ČSN EN 50121-3-2.

Emise produkované zařízením, kterého se norma týká, musí splňovat maximální hodnoty uvedené ve všeobecné normě EN 61000-6-4. Specifika zkoušky jsou však uvedena zde, jedná se o definování měřící vzdálenosti a případné přepočty výsledků vzhledem k této vzdálenosti.

Z hlediska odolnosti se používají funkční kritéria uvedená již v ČSN EN 50121-1. Zkoušky se provádějí metodou postupného testování, jako jednotlivé zkoušky za sebou, viz. tabulka 3.2 a tabulka 3.3. Měly by být prováděné při typických provozních režimech, kdy je uvažována maximální úroveň rušení v daném frekvenčním rozsahu. Popis zkušebních metod není v této normě uveden, je zde opět uveden odkaz na základní normy, zabývající se zkouškami odolnosti.

3.3.6 ČSN EN 50121-5

Pro zajištění kompatibilní úrovně elektromagnetické emise a odolnosti pro elektrická a elektronická zařízení, určené k použití v pevných trakčních zařízeních, je stanovena norma ČSN EN 50121-5. Zahnuje napájecí trakční stanice, prostředky s obvody ochrany, výkonové autotransformátory, zvyšovací transformátory a spínače pro dálkové i místní napájení. Filtry pracující v napájecí síti, například pro kompenzaci účinníku, nejsou předmětem této normy, pro ně jsou stanoveny jiné specifické požadavky.

Norma definuje emise a odolnosti pro zařízení, která jsou umístěna uvnitř napájecí stanice nebo v prostoru elektrifikované trati a případně i pro přístroje, které jsou napájené z trakčního vedení, ale neslouží k trakčním účelům. Konkrétně se jedná o prostředky staniční služby (návěstní soustava), nádražní osvětlení, nakládací jeřáby a administrativní budovy.

Emise se rozlišují na vyzařování z vlastní trakční stanice do okolí a na generované uvnitř samotných napájecích stanic. Hranice záření do okolí jsou pro kmitočtové pásmo 9 kHz až 1 GHz stanoveny společně normou ČSB EN 50121-2. Pro zařízení umístěné pod zemí se musí provést měření v rozsahu 9 kHz až 150 kHz v prostoru na povrchu nad zařízením. Pokud se jedná o venkovní nebo kabelová vedení mezi napájecí stanicí a dráhou, není zde z důvodu rozmanitosti možné stanovit mezní hodnoty pro magnetická pole, která vytvářejí. Ze stejného důvodu nejsou určeny meze pro rušení uvnitř trakčních napájecích stanic.

Funkční kritéria jsou používány všeobecně, tzn. stejně jako jsou uvedené v normě ČSN EN 50121-1. Pro zkoušky odolnosti platí to samé jako v ČSN EN 50121-4, zkušební metody jsou uvedeny v tabulkách 3.2 a 3.3.

4

Elektromagnetické vlny

4.1 Šíření ve volném prostředí

4.1.1 Obecná vlnová rovnice

Elektromagnetickým vlněním je označováno šíření nestacionárního elektromagnetického pole. Jedná se o vektorové pole, pro jehož obecný popis je potřeba znát následující čtveřici vektorů pole v každém bodě prostoru.

\mathbf{E}	$[V/m]$	intenzita elektrického pole
\mathbf{D}	$[C/m^2]$	indukce elektrická
\mathbf{B}	$[Wb/m^2], [T]$	indukce magnetická
\mathbf{H}	$[A/m]$	intenzita magnetického pole

Pro řešení pole ve vakuu nebo v prostředí se známými materiálovými konstantami postačuje jakákoliv dvojice vektorů, kdy jeden je vektorem elektrického pole a druhý magnetického pole. To znamená, že libovolná dvojice z variant \mathbf{EB} , \mathbf{EH} , \mathbf{DH} a \mathbf{DB} postačuje pro popis a řešení elektromagnetického pole. Relace mezi vektory indukce a intenzity popisují parametry prostředí.

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (4.2)$$

Pro úplnost je v tabulce 4.1 přehled možných materiálových parametrů prostředí včetně hodnot pro vakuum, které jsou odlišené indexem 0.

Tabulka 4.1: Materiálové vlastnosti prostředí			
permitivita	ε	$[F/m]$	$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$
permeabilita	μ	$[H/m]$	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$
měrná vodivost	σ	$[S/m]$	

Podle [1, str.33] existují dva možné přístupy k řešení polí, související s časovou proměnností pole.

Stacionární pole Určují se všechny zdroje a následně ke každému z nich jejich prostorové rozložení pole. Výsledkem je superpozice všech polí.

Nestacionární pole Sestavíme diferenciální rovnici pro některý z vektorů pole. Následně nalezneme obecné řešení a dle okrajových podmínek vybereme nejhodnější.

Podrobné odvození vlnových rovnic pro vektory pole \mathbf{E} a \mathbf{B} , pro časově neměnné parametry prostředí, se nachází v příloze A.

4.1.2 Harmonické pole

4.1.3 Rovinná vlna

str.40

4.2 Rozhraní dvou prostředí

str.86, 91, 92, 94, 95, 96

4.3 Vrstvené prostředí

str.103

str.104 - čtvrtvlnný transf

str.107 půlvlnné diel okno

4.4 Vlnovody

4.4.1 Klasifikace vln

str.112 - TEM, TE, TM, HE, EH

str.108 - obecně

str.131 - TE, $E_z = 0$, TM $H_z = 0$

str.143 - Snell

4.4.2 Kritická frekvence

str.132

4.5 Dutinové rezonátory

str.150

str.151 - rez. kmitočet

5

Simulace

5.1 Předpoklady simulace

str.108

5.2 Metoda konečných prvků

- sdaf
- sdaf
- sdaf
- sdaf
- sdaf
- sdaf
- sdaf
- sdaf

6

Závěr

Literatura

- [1] NOVOTNÝ, K.: **Elektromagnetické pole a vlny: teorie elektromagnetického pole II**, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001, ISBN 80-01-02429-6
- [2] *Oficiální internetové stránky sdružení hpFEM*, citováno dne 2. února 2011
<http://www.hpfem.org/>
- [3] KŮS, V., SKÁLA, J., LAURENC, J.: **Elektrická trakce a EMC**, odborný článek, Plzeň 1997
- [4] KŮS, K.: **Nízkofrekvenční rušení**, skriptum, Západočeská univerzita, Plzeň 2003, ISBN 80-7082-976-1

Seznam obrázků

3.1	Hranice emisí jednotlivých trakčních systémů.	6
3.2	Hlavní druhy vstupů a výstupů zařízení.	7
3.3	Hlavní druhy vstupů a výstupů zařízení.	7
A.1	Vnucený proud vnějším zdrojem.	23

Seznam tabulek

3.1	Přehled měřených frekvenčních rozsahů a měřících antén.	6
3.2	Popis zkoušek odolnosti pro vstupy a výstupy krytem.	8
3.3	Další metody zkoušek odolnosti dle příslušné normy.	9
4.1	Materiálové vlastnosti prostředí	11



Odvození vlnových rovnic.

K sestavení vlnové diferenciální rovnice pro vektor intenzity elektrického pole \mathbf{E} nebo vektor indukce magnetického pole \mathbf{B} využijeme diferenciální tvar Maxwellových rovnic.

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru.

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{A.2})$$

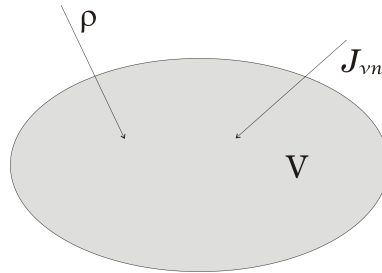
$$\text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (\text{A.3})$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (\text{A.4})$$

Vlnová rovnice pro vektor intenzity elektrického pole \mathbf{E} .

Dle [1, str. 33] uvažujeme případ, že se v daném objemu nachází indukovaný proud a navíc proud, který vnucen vnějším zdrojem. Důsledkem je modifikace rovnice (A.1).

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}_{vn} \quad (\text{A.5})$$



Obrázek A.1: Vnucený proud vnějším zdrojem.

Vyjádření $\text{rot } \mathbf{B}$ z rovnice (A.5).

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{B} &= \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}_{vn} \\ \text{rot } \mathbf{B} &= \mu \sigma \mathbf{E} + \mu \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \mathbf{J}_{vn} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Na druhou Maxwellovu rovnici (A.2) aplikujeme operaci rotace.

$$\text{rot rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \mathbf{B}$$

Za výraz $\text{rot } \mathbf{B}$ na pravé straně rovnice dosadíme z (A.6).

$$\text{rot rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu\sigma \mathbf{E} + \mu\varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \mathbf{J}_{vn} \right)$$

Pravou stranu rovnice roznásobíme a na levou použijeme vztah vektorové identity $\text{rot rot } \mathbf{E} = \text{grad div } \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E}$.

$$\text{grad div } \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E} = -\mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial \mathbf{J}_{vn}}{\partial t}$$

Ze třetí Maxwellovy rovnice (A.3) dosadíme za $\text{div } \mathbf{E}$ výraz $\frac{\rho}{\varepsilon}$. Úpravou přesuneme na pravou stranu zdrojové funkce elektromagnetického pole a dostaneme výslednou vlnovou rovnici pro vektor intenzity elektrického pole \mathbf{E} .

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \text{grad } \frac{\rho}{\varepsilon} + \mu \frac{\partial \mathbf{J}_{vn}}{\partial t} \quad (\text{A.7})$$

Rovnice (A.7) je dle [1] označována jako **zobecněná nehomogenní vlnová rovnice**.

Vlnová rovnice harmonického pole pro vektor \mathbf{E} .

Veličiny pole se pro harmonické pole vyjadřují pomocí fázorů. Z výše odvozené vlnové rovnice (A.7) pomocí vztahu pro obraz derivace $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$ dostaneme.

$$\nabla^2 \mathbf{E} - j\omega\mu\sigma \mathbf{E} - j^2\omega^2\mu\varepsilon \mathbf{E} = \text{grad } \frac{\rho}{\varepsilon} + j\omega\mu \mathbf{J}_{vn}$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} - j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \mathbf{E} = \text{grad } \frac{\rho}{\varepsilon} + j\omega\mu \mathbf{J}_{vn}$$

Zavedeme konstantu šíření $k = \pm\sqrt{-j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)}$. Tím dostaneme výslednou vlnovou rovnici pro vektor intenzity elektrického pole v harmonickém prostředí.

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = \text{grad } \frac{\rho}{\varepsilon} + j\omega\mu \mathbf{J}_{vn} \quad (\text{A.8})$$

Pro oblast bez vnějších zdrojů platí $\rho = 0$ a $\mathbf{J}_{vn} = 0$. Zavedení této úpravy dostaneme z rovnice (A.8) vztah.

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (\text{A.9})$$

Vlnová rovnice pro vektor indukce magnetického pole \mathbf{B} .

Vycházíme ze stejné počáteční úvahy jako při odvození vlnové rovnice pro vektor elektrické intenzity \mathbf{E} . Z modifikované první Maxwellovy rovnice (A.5) opět vyjádříme $\text{rot } \mathbf{B}$. Následně aplikujeme operaci rotace.

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu\sigma \mathbf{E} + \mu\varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \mathbf{J}_{vn}$$

$$\text{rot rot } \mathbf{B} = \mu\sigma \text{rot } \mathbf{E} + \mu\varepsilon \frac{\partial \text{rot } \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \text{rot } \mathbf{J}_{vn}$$

Na levou stranu použijeme vztah vektorové identity $\text{rot rot } \mathbf{B} = \text{grad div } \mathbf{B} - \nabla^2 \mathbf{B}$. Za výraz $\text{rot } \mathbf{E}$ dosadíme z druhé Maxwellovy rovnice (A.2).

$$\text{grad div } \mathbf{B} - \nabla^2 \mathbf{B} = -\mu\sigma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} + \mu \text{rot } \mathbf{J}_{vn}$$

Nakonec využijeme čtvrtou Maxwellovu rovnici (A.4), přičemž $\text{div } \mathbf{B} = 0$ a opět upravíme tak, aby na pravé straně vlnové rovnice vystupovaly zdrojové funkce.

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = -\mu \text{rot } \mathbf{J}_{vn} \quad (\text{A.10})$$

Vlnová rovnice harmonického pole pro vektor \mathbf{B} .

Vlnovou rovnici (A.10) upravíme opět obrazem derivace $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$.

$$\nabla^2 \mathbf{B} - j\omega\mu\sigma \mathbf{B} - j^2\omega^2\mu\varepsilon \mathbf{B} = -\mu \text{rot } \mathbf{J}_{vn}$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} - j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \mathbf{B} = -\mu \text{rot } \mathbf{J}_{vn}$$

Zavedeme konstantu šíření $k = \pm\sqrt{-j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)}$ a dostaneme vlnovou rovnici pro vektor indukce magnetického pole v harmonickém prostředí.

$$\nabla^2 \mathbf{B} + k^2 \mathbf{B} = -\mu \text{rot } \mathbf{J}_{vn} \quad (\text{A.11})$$

Pokud se jedná o oblast ve které nejsou žádné vnější zdroje platí, platí $\mathbf{J}_{vn} = 0$. Tímto doplněním z rovnice (A.11) dostaneme.

$$\nabla^2 \mathbf{B} + k^2 \mathbf{B} = 0 \quad (\text{A.12})$$

Vlnové rovnice pro vektory \mathbf{D} a \mathbf{H} .

Pro úplnost jsou zde uvedeny i rovnice pro vektory elektrické indukce \mathbf{D} a magnetické intenzity \mathbf{H} . Analogickým odvozením z Maxwellových rovnic dostaneme téměř identické vztahy jako (A.7) a (A.10).

$$\nabla^2 \mathbf{D} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2} = \text{grad } \rho + \mu\varepsilon \frac{\partial \mathbf{J}_{vn}}{\partial t}$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = -\text{rot } \mathbf{J}_{vn}$$

Je zřejmé, že tyto vztahy můžeme získat rovnou z vlnových rovnic pro daný vektor vynásobením nebo vydělením příslušnou materiálovou konstantou.



Obsah přiloženého CD-ROM

- text diplomové práce ve formátu PDF a TEX
- obrázky použité v diplomové práci ve formátu PNG