

POSUDEK OPONENTA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Bc. David PAZDERKA

Oponent: Ing. Milan PŘÍHODA, Ph.D.

Studijní program: Inženýrská informatika

Studijní obor: Informační technologie

Akademický rok: 2020/2021

Téma diplomové práce: Experimentální ověření 3D modelu GTEM cely

Diplomová práce **Experimentální ověření 3D modelu GTEM cely** pana Bc. Davida Pazderky řeší velice zajímavou a pro technickou praxi velmi důležitou úlohu. Stěžejní cíl práce spočívá ve vytvoření počítačového modelu GTEM cely pro numerickou simulaci elektromagnetického pole a ověření výsledů numerické simulace laboratorním experimentem.

Téma práce bezesporu aktuální je. Práce ve skutečnosti pokrývá dvě velmi aktuální témata, problém elektromagnetické kompatibility a problém tvorby takzvaného Digital Twin – Digitálního dvojčete. Obě témata silně rezonují v R&D odděleních světových hráčů na poli elektroniky a dá se očekávat další rozvoj tímto směrem. Téma diplomové práce považuji spíše za nadprůměrně obtížné (má-li být vypracováno rigorózně). Klade na studenta nároky ohledně znalostí numerických simulací (alespoň na úrovni uživatele softwarového nástroje) a zároveň klade nároky na znalosti a zkušenosti v oblasti laboratorního měření.

V *části I*, (Teoretická Část), jsou 3 kapitoly obsahující rešerši na téma EMC, lze konstatovat, že tato část diplomové práce plní 1. bod zadání práce, nicméně si myslím, že student mohl v teoretické části věnovat více pozornosti samotné GTEM cele. Například v kapitole 3.4.2 je několikrát odkazováno na pramen [13] a [20], ale žádné faktické informace z těchto zdrojů se v práci bohužel nevyskytují.

[Poznámka: Prameny [13] a [20] jsou dva vědecké články publikované v letech 2019 a 2017. V obou člancích autoři rozebírají konstrukce GTEM cel, popisují numerické simulace, včetně základních ukazatelů jako je koeficient přizpůsobení dané GTEM cely, diskutují uniformitu pole, rozložení pole a další klíčové vlastnosti vedoucí k pochopení základního principu a funkce GTEM cely.]

Co naopak považuji za nadbytečné a nerelevantní pro danou práci je obsah kapitol

1.2 EMC biologických systémů

a

2 NORMALIZACE A STANDARDIZACE V OBLASTI ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY

Důvodem je, že diplomová práce dále neřeší ani biologické účinky EM pole, ani není měřen nebo testován žádný konkrétní objekt/produkt/součást, která by vyžadovala využití zmíněných norem. Pokud jde o normalizace/standardizace v oblasti EMC, bylo by mnohem přínosnější detailně rozebrat normu ČSN EN 61000-4-20, která je zmiňována i v obou již uvedených pramenech [13] a [20] a která řeší uniformitu pole v testovacích komorách s TEM videm.

Podstatná, z hlediska přínosu, je zejména *část II* (Praktická část) diplomové práce, kde je popsán 3D model GTEM cely, který slouží pro numerickou simulaci elektromagnetického pole a kde je také rozebrán laboratorní experiment. Tato část obsahuje 6 kapitol a lze také konstatovat, že tato část diplomové práce plní zbývající body zadání diplomové práce, tj. body 2-5.



Zde je třeba vyzdvihnout dobře realizovanou i zdokumentovanou tvorbu 3D modelu a zároveň i fakt, že byl student schopen využít nástroj CST Studio Suite s omezením Teaching licence, která má tvrdá omezení na počet buněk diskretizovaného modelu. Autor práce se musel také vypořádat s faktem, že elektrické vlastnosti materiálu absorbérů v GTEM cele nejsou dobře známé a na základě měřených dat upravit model použitého materiálu tak, aby dosáhl lepší shody. Neznalost materiálových vlastností jako vstupu pro simulaci je bohužel v praxi velice častá a i zde je třeba vyzdvihnout, že student navrhl řešení, které vedlo k eliminaci problému. I přes tyto překážky, které často vedou na vážné artefakty v simulačních výsledcích nebo dokonce na neschopnost simulaci spustit, přinesla numerická simulace uvěřitelné výsledky

Pro experimentální ověření byla bohužel zvolena poměrně komplikovaná metodika, která sama o sobě vnáší do celé úlohy dodatečné systematické i náhodné chyby. Autor práce si je vědom náhodných chyb a vyhodnocuje nejistotu typu A. Systematické chyby nejsou řešeny důkladně, nebo jejich řešení práce nepopisuje. Ověření modelu bylo provedeno laboratorním měřením intenzity E pole v šesti různých bodech uvnitř GTEM cely při externím buzení. V simulaci se hodnoty výsledného E pole odečítají na stejných pozicích, takže při shodě hodnot ze simulace a z měření bychom mohli model prohlásit za ověřený. To se v práci s určitou odchylkou povedlo a lze tedy zkonstatovat, že numerický model GTEM cely byl experimentálně ověřen.

Na tomto místě bych ovšem vytkl nedostatečné vysvětlení výkonových poměrů. Pokud bylo ověření postaveno na srovnání absolutních hodnot E pole, očekával bych důkladnější vysvětlení, jakým výkonem byla GTEM cela buzena, jakým výkonem byly buzeny jednotlivé zesilovače z generátoru signálu (nepracoval některý ze zesilovačů již v oblasti 3dB komprese?). Byla výkonová úroveň konstantní pro všechny frekvence? Chybí vysvětlení proč je v simulaci GTEM cela buzena proudovým zdrojem 100A. To vše je bohužel velmi důležité, pokud se ověření staví na srovnání absolutních hodnot velikostí elektrického pole.

Z formálního hlediska považuji práci za dobrou, ale domnívám se, že student technické university by se měl v technických textech vyvarovat formulací jako „sonda byla umístěna od oka“ nebo „posunuta o malý kousek“. Ani jeden z výrazů nepomáhá čtenáři kvantifikovat přesnost a opakovatelnost umístění sondy.

Ke způsobu řešení úlohy mám několik poznámek:

Práce splnila zadání, nicméně širší souvislosti daného problému zůstaly opominuty. Znalost absolutní hodnoty pole v určitém místě cely je nezbytně nutná pro testování konkrétního zařízení, ale je méně důležitá k obecné verifikaci nebo zkoumání správné funkce GTEM cely. V práci postrádám diskuzi nad dvěma vlastnostmi GTEM cely.

Tvar/rozložení E-pole uvnitř cely a koeficient odrazu.

Uniformita pole je jedna z klíčových vlastností GTEM cel. I kdyby byly odchylky v absolutních hodnotách E pole vyšší, ale rozložení pole na základě měřených hodnot „tvarově“ odpovídalo poli v simulaci, považoval bych to za kvalitnější ověření. S tím souvisí jeden fakt, že tvar pole uvnitř cely není nikde v práci vyobrazen.

Koeficient odrazu (resp. Impedanční přizpůsobení) je parametr, který je v teoretické části práce slovně zmíněn, ale dále již není zkoumán. Simulace v CST Studio Suite takový výsledek přináší a bylo by možné jej porovnat například s měřením pomocí vektorového analyzátoru obvodů. Výhoda takového experimentu by spočívala v tom, že uvnitř cely by nemusela být žádná sonda, tedy měřený objekt by se více blížil numerickému modelu a z frekvenční závislosti komplexního koeficientu odrazu by se lépe optimalizoval neznámý materiál absorbérů.

I přes zmíněné nedostatky je při hodnocení práce třeba přihlídnout k výše uvedenému faktu, že práce vyžaduje hluboké znalosti z několika různých disciplín. Téma samo o sobě je však velice důležité a doporučuji jej dále rozvíjet v podobě dalších diplomových a bakalářských prací.

Otázky k obhajobě:

- 1) Popište, jak by mělo vypadat rozložení E pole v GTEM cele.
- 2) Máte za úkol zkonstruovat GTEM celu. Vstup má být přizpůsoben na impedanci Z_t . Septum je potřeba zakončit odporovou sítí o N rezistorech. Všechny N rezistorů má stejnou hodnotu odporu R_1 . Odvoďte obecný vztah pro určení hodnoty R_1 , při zadání N a Z_t .
→ Tedy najdete algebraický zápis funkce $R_1=f(N, Z_t)$. Pro jednoduchost stačí úlohu vyřešit pro stacionární ustálený stav, tedy pro stejnosměrné buzení.
- 3) V práci je zmíněn limit Teaching licence CST Studio Suite, který omezuje model na 1 milion buněk (pro časový solver). Jednou z možností jak zredukovat množství buněk v simulaci a zároveň udržet ekvivalentní přesnost je zavedení symetrií. V každé ose kartézského systému můžeme model prohlásit symetrickým podle elektrické nebo magnetické roviny symetrie. Krátce popište kdy je možné roviny symetrie zavést a diskutujte, zda by bylo možné zavést roviny symetrie do modelu GTEM cely, v jakých osách a zda magnetické nebo elektrické.
- 4) V kapitole 3.4.2 je uvedeno, že impedanční přizpůsobení cely je na nízkých kmitočtech zajištěno odporovou sítí a na vyšších kmitočtech pomocí absorbérů. Naznačte a diskutujte postup, kterým byste u Vámi zkoumané cely mohl určit rozsah frekvencí kde je přizpůsobení dominantně určeno odporovou sítí a rozsah frekvencí které jsou přizpůsobeny vlivem absorbérů. Vyberte libovolný přístup – numerická simulace, laboratorní experiment, analytické řešení nebo kombinace výše uvedených.
- 5) Výrobce sondy EFS-10 která byla použita v práci tvrdí, že sonda je navržena tak aby neovlivňovala svou přítomností hodnotu/tvar pole. Výrobce, firma Frankonia doslova uvádí: “The EFS is an isotropic miniature E-field sensor to ensure that the E-field will not be influenced by the size of the sensor itself“. Navrhněte postup, kterým by bylo možné tvrzení výrobce potvrdit nebo vyvrátit. Vyberte libovolný přístup – numerická simulace, laboratorní experiment, analytické řešení nebo kombinace výše uvedených.

Celkové hodnocení práce:

Známku uvede oponent dle svého uvážení dle klasifikační stupnice ECTS:

A – výborně, B – velmi dobře, C – dobře, D – uspokojivě, E – dostatečně, F – nedostatečně.

Stupeň F znamená též „nedoporučuji práci k obhajobě“.

**Předloženou diplomovou práci doporučuji k obhajobě a navrhuji hodnocení
C - dobře.**

V případě hodnocení stupněm „F – nedostatečně“ uveďte do připomínek a slovního vyjádření hlavní nedostatky práce a důvody tohoto hodnocení.