Odolnosť elektronických zariadení voči výkonovým elektromagnetickým impulzom

Ján OCHODNICKÝ[1], František NEBUS[2], Zdeněk MATOUŠEK[3]

Abstrakt: Oblasť HPM (High Power Microwave) technológií je predmetom výskumu celý rad rokov a obzvlášť v posledných rokoch s narastajúcou elektronizáciou a „digitalizáciou“ nášho života nadobúda osobitný význam. Myšlienka využitia silných elektromagnetických polí v praxi je síce známa už z obdobia Nikolu Teslu, ale ovplyvňovanie činnosti elektronických systémov, alebo ich vyradenie z činnosti na relatívne veľké vzdialenosti umožňujú až výskumy posledných rokov. Tieto výsledky ukazujú, že odolnosti elektronických zariadení voči výkonovým elektromagnetickým poliam je potrebné venovať osobitnú pozornosť. Elektromagnetickú susceptibilitu (EMS) je možné skúmať tak z pohľadu teórie elektromagnetickej kompatibility (EMC), ako i z pohľadu teórie spoľahlivosti. V tomto článku je zameraná pozornosť na niektoré súvislosti medzi spoľahlivosťou činnosti elektronických systémov a ich elektromagnetickou susceptibilitou.

ÚVOD

Elektromagnetická susceptibilita (EMS) vyjadruje schopnosť zariadenia a systému pracovať bez porúch, alebo s presne definovaným prípustným vplyvom v prostredí, v ktorom sa vyskytuje elektromagnetické rušenie (pole). Tento pojem úzko súvisí s problematikou elektromagnetickej kompatibility (EMC). H. M. Schlike, jeden zo zakladateľov elektromagnetickej kompatibility ako samostatného vedecko-technického oboru, už v roku 1968 povedal: "Systém sám o sebe môže byť dokonale spoľahlivý - bude však prakticky bezcenný v prevádzke, pokiaľ súčasne nebude elektromagneticky kompatibilný. Spoľahlivosť a elektromagnetická kompatibilita sú neoddeliteľné požiadavky na systém, ktorý má fungovať v každej dobe a za všetkých okolností".

V zahraničnej odbornej tlači bolo publikovaných množstvo príkladov, kedy nedodržanie požiadaviek EMC malo katastrofálne následky, medzi inými:

- *Zničenie stíhacieho lietadla NATO typu Tornado v roku 1984*. Príčinou katastrofy bolo rušenie elektronického riadiaceho systému lietadla elektromagnetickým poľom. Lietadlo letelo vo výške 230 m rýchlosťou 800 km/hod nad vysielačom veľkého výkonu v Holkirchene pri Mníchove v SRN. V dôsledku zlyhania automatického systému riadenia sa lietadlo zrútilo. Hmotná škoda bola vyčíslená na 100 mil. mariek.
- *Potopenie britského krížnika Sheffield v roku 1982* v priebehu falklandského konfliktu argentínskym lietadlom. Príčinou bolo nedodržanie elektromagnetickej kompatibility medzi palubným komunikačným zariadením lode a jej rádiovým obranným protilietadlovým systémom určeným k rušeniu cieľovej navigácie nepriateľských rakiet. Tento systém spôsoboval také veľké poruchy pri vlastnej rádiovej komunikácii krížnika, že musel byt počas rádiového spojenia lode s veliteľstvom vo Veľkej Británii vypínaný. A práve v takom okamžiku odpálilo argentínske lietadlo raketu Exocet, ktorá krížnik potopila. Dvadsať ľudí prišlo o život.

[1] **doc. Ing. Ján OCHODNICKÝ, PhD.,** tel: 0960 423 880, e_mail: Jan.Ochodnicky@aos.sk
[2] **doc. RNDr.František NEBUS, PhD.,** tel: 0960 423 884, e_mail: Frantisek.Nebus@aos.sk
[3] **doc. Ing. Zdeněk MATOUŠEK**, **PhD.,** tel: 0960 423 885, e_mail: Zdenek.Matousek@aos.sk
Katedra elektroniky, AOS gen. M. R. Štefánika v Liptovskom Mikuláši, 031 19 Liptovský Mikuláš

- *Havária rakety typu Persching II v SRN v dôsledku elektrostatického výboja*. Pri prevoze rakety bol jej pohon neúmyselne odpálený elektrostatickou elektrinou z blízkej búrky.
- *Havária systému hromadného diaľkového ovládania ťažobných mechanizmov* na Náchodsku. K havárii došlo pri pripojení ťažobného stroja o výkone 3,4 MW k rozvodnej sieti 35 kV. Ťažobné zariadenie tvoril pohon s tyristorovou reguláciou, pričom jeho menič bol pripojený k rozvodnej sieti priamo bez zodpovedajúcej filtrácie a kompenzácie. Rušivý spätný vplyv meniča spôsobil zrútenie systému hromadného diaľkového ovládania (a tým i samého seba) nielen v okolí bane, ale prakticky v celej oblasti Náchodska.
- *Havarijný stav v cukrovare Mělník po inštalácii odstrediviek s tyristorovými meničmi* s výkonom 200 kW namiesto klasických rotačných meničov. Po ich pripojení k sieti 22 kV došlo k takému kolísaniu a deformáciám napájacieho napätia, že nastal skupinový výpadok meničov pôsobením napäťových ochrán. Pritom toto zhoršenie kvality napájacej siete vyvolali vlastne samotné meniče, ktoré boli (podľa vtedajších zvyklostí) pripojené na sieť priamo bez potrebnej filtrácie a kompenzácie. Vznikla tak opäť paradoxná situácia, pri ktorej sa zdroj rušenia stal obeťou vlastného rušenia.
- *Havárie v zdravotníckych zariadeniach*. Diagnostická súprava na jednotke intenzívnej starostlivosti nemocnice v Prahe monitorovala dych, tep a teplotu pripojených pacientov. Spínanie okolitých silových spotrebičov však vyvolávalo v kardioskope prídavné impulzy, ktoré boli vyhodnocované ako nesynchrónny tep srdca. Navyše, nespoľahlivý štartér žiarivkového svietidla blízko jednotky, ktorý spínal každú sekundu, vyvolával trvalo hlásenie prekročenia medze tepov a blokoval meranie. Celá súprava vzhľadom na jej absolútnu neodolnosť voči rušeniu musela byť vymenená za iný systém spĺňajúci požiadavky EMC.

EMS sa na rozdiel od EMC zaoberá predovšetkým technickými opatreniami, ktoré zvyšujú tzv. elektromagnetickú imunitu systému, teda jeho odolnosť voči vplyvu rušivých signálov. Môžeme teda povedať, že EMS rieši skôr problémy odstraňovania dôsledkov rušenia bez odstraňovania jeho príčin. Takto postavený problém je obzvlášť zaujímavý nielen z hľadiska obranných systémov, ale napríklad i v priemysle (napr. automobilový priemysel).

Okrem merania rušenia sa v súčasnej dobe pomerne rýchle rozvíja i oblasť testovania elektromagnetickej susceptibility systémov pomocou tzv. simulátorov rušenia. Ide teda v podstate o praktické overenie stupňa EMS navrhnutého zariadenia. Testovanie sa vykonáva nielen na hotových zariadeniach, ale taktiež v priebehu ich vývoja [1].

Základnými spôsobmi šírenia elektromagnetických rušivých signálov sú:
- galvanická väzba, pri ktorej sa rušenie šíri priamym prepojením (galvanickým spojením) obidvoch objektov (rušiaceho aj rušeného)
- indukčná väzba (rušivý signál sa šíri indukciou vyvolanou zmenami elektromagnetického poľa medzi vodičmi so vzájomným indukčným vzťahom – vodiče a káble, resp. celé zariadenia ležia blízko seba, paralelný súbeh uložených vodičov a pod.)
- kapacitná väzba (obdoba indukčnej, ale vzájomná väzba pre šírenie signálu má kapacitný charakter)
- väzba priamym elektromagnetickým poľom (rušivý signál sa šíri prostredím ako ktorékoľvek iné elektromagnetické pole – toto pole má intenzitu, ktorá zo vzdialenosťou klesá a preto pôsobí podobne ako rádiové signály).

Dôležitou súčasťou elektronických systémov z hľadiska ich ochrany voči rušeniu najmä v nízkonapäťových systémoch sú rôzne prídavné odrušovacie zariadenia [2].

Problematika HPM je najčastejšie spájaná s vojenskou terminológiou ako jedna z metód elektronického boja – elektronický útok. V tejto súvislosti sa hovorí taktiež o tzv. nesmrtiacich zbraniach (nonlethal weapons) [3].

Zdroje využívajúce usmernenú energiu (elektromagnetická energia) namiesto usmernenej hmoty (projektil) v posledných dvoch dekádach prešli významným vývojom. Uvedený progres bol podmienený dosiahnutým technologickým pokrokom v oblasti elektroniky a plazmovej fyziky a tiež požiadavkami "humánnejších – nesmrtiacich" zbraní vo vojenstve. V porovnaní s existujúcimi zbraňovými systémami majú dve podstatné výhody. Účinok dosahujú rýchlosťou šírenia svetla v danom prostredí (≈300 000 km/s), čo je 160 000 rýchlejšie ako je rýchlosť projektilu a sú použiteľné na ovplyvnenie činnosti (zabránenie činnosti) aj bez presnej znalosti ich pozície v krytoch a budovách, pričom namiesto zásobníkov plných munície a s ňou súvisiacou logistikou využívajú energetické zdroje. Tieto faktory dramaticky menia i stratégiu a taktiku vedenia vojenských konfliktov.

Zdroje s usmernenou energiou (DEW – Directed Energy Weapons) sa principiálne delia na tri kategórie [4]:

- mikrovlnové zdroje (HPM – High Power Microwave) v pásme 30 MHz – 300 GHz teoreticky (aktuálne 30MHz – 30 GHz),
- laserové–elektrooptické zdroje,
- zdroje s usmerneným tokom elektricky nabitých častíc.

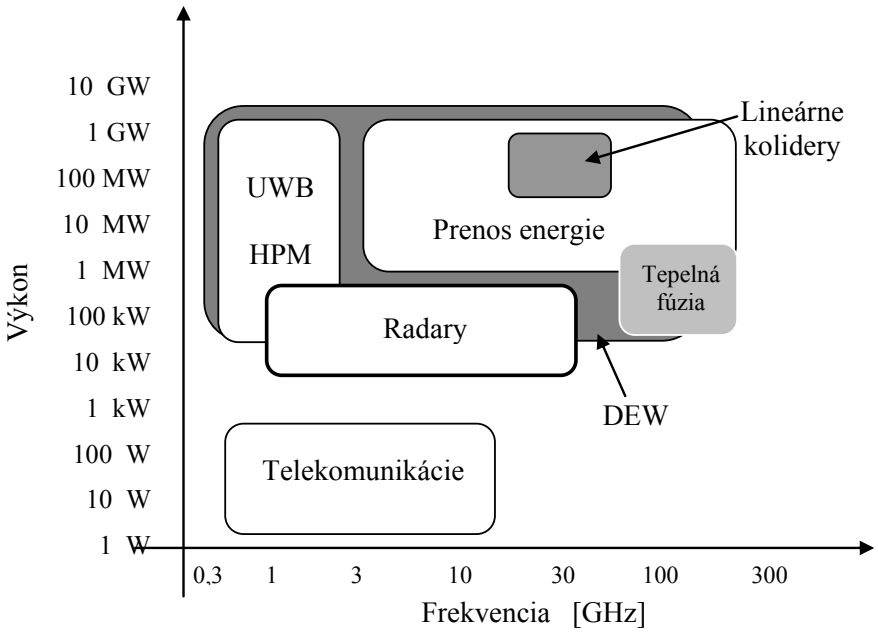
HPM majú oproti zvyšným dvom DEW tú výhodu, že ich účinnosť nie je obmedzená zhoršenými poveternostnými podmienkami pri šírení v atmosfére (dym, hmla, dážď) a navyše nepotrebujú až také extrémne presné zameranie, pretože nemajú takmer bodové účinky ako ostatné dva typy. Navyše, súčasná veda a technológie umožňujú dosiahnuť také technické parametre HPM, že sa stávajú veľmi zaujímavé z hľadiska vojenského použitia.

Problematika vývoja HPM zbraní zahŕňa technológie zvýšenia vybudenej mikrovlnovej energie v historicky najdlhšie známych magnetrónoch, elektrónkach s postupnou vlnou (TWT) a oscilátoroch so spätnou vlnou (BWO) zvyšovaním pracovných prúdov (kA) a zlepšením väzby a tým interakcie elektrónového lúča a poľa v rezonančnej oblasti. Prekročením relativistickej energie elektrónov (510 keV) sa dosiahla nová kvalitatívna úroveň vo vývoji HPM zariadení s možnosťou konštrukcie oscilátorov s virtuálnou elektródou (virkátor) a relativistických klystrónov. Ďalšími zariadeniami, ktoré využívajú relativistické efekty sú gyrotróny a cyklotróny, známe už v minulosti.

Na obrázku 1 sú znázornené typické výkonové parametre niektorých vybraných HPM zdrojov.

Druhou oblasťou, ktorá zasahuje do vývoja HPM zdrojov sú technológie výroby výkonových impulzových zdrojov. Pretože očakávaný vyžiarený elektromagnetický impulz má mať čo najväčšiu šírku spektra (ultra-wide band - UWB) zasahujúcu od frekvenčného pásma stoviek MHz až po desiatky GHz, je požadovaná dĺžka impulzu rádu jednotiek, maximálne desiatok *ns*. Hoci celková prenesená energia v prípade HPM predstavuje obyčajne len jednotky až desiatky J, v spojení s krátkym impulzom predstavuje výkony stoviek MW až jednotiek GW.

Treťou oblasťou, ktorá významne ovplyvňuje možnosti použitia HPM, je technológia prenosovej trasy a antén, ktoré umožňujú vyžiariť energiu do záujmového priestoru. Teoretické riešenia prenosu požadovaných výkonov spadajú do vedeckej oblasti plazmovej fyziky a technické aplikácie do laboratórií najväčších firiem zaoberajúcich sa vývojom výkonovej komunikačnej technológie.



Obr. 1 Typické výkonové charakteristiky HPM zdrojov

Za rozhodujúcu charakteristiku samotných HPM zariadení sa vo vedeckých kruhoch najčastejšie používa parameter $P \cdot f^2$, kde *P* predstavuje výkon a *f* frekvenciu, pretože odráža dve dôležité proporcionality. Vrcholový výkon vyžiarený z rezonančnej dutiny obvykle vedený vlnovodom je priamoúmerný štvorcu vlnovej dĺžky. Navyše jeho maximálna hodnota je v danom prostredí limitovaná rozmermi vlnovodu (pri prekročení medze dochádza k prierazu prostredia) a v prípade vyžiarenia je pre danú anténu úmerný zisku antény (apretúre), ktorý je tiež úmerný štvorcu frekvencie.

Posledné známe poznatky ukazujú, že očakávané maximálne hodnoty parametra $P \cdot f^2$ sa pre klasické zariadenia ako magnetróny a klystróny pohybujú na hranici 1 $[GW \cdot GHz]$ a pre relativistické zariadenia 10^4 $[GW \cdot GHz]$. Konečné hranice pre vrcholové hodnoty výkonu HPM zbraní nie sú dodnes presne definované. Jeho hodnota súvisí s procesmi formovania plazmy na vodivom rozhraní a v spínačoch (napr. diódach).

Ďalšou cestou zvyšovania celkových účinkov HPM zdrojov je zvyšovanie opakovacej frekvencie spínaných maximálnych výkonov, ktorá pri prekročení medznej frekvencie (tá je individuálna pre každý elektronický prvok a následne systém a zvyčajne predstavuje jednotky až desiatky Hz) zabezpečuje kumulatívny efekt zvyšovaním stredného výkonu. Obvykle však súvisí s celkovou robustnosťou technickej realizácie HPM zdroja a preto má uplatnenie len pri zdrojoch s ochranným charakterom a konečné riešenie predstavuje kompromis medzi oboma hodnotami. Navyše súvisí s efektivitou samotného zariadenia ktorá má tiež svoje obmedzenie.

Podľa charakteru generovaného rušivého (ničivého) signálu možno HPM deliť na úzkopásmové a širokopásmové. S touto charakteristikou je spätá i dĺžka generovaného impulzu, ktorá u širokopásmových HPM predstavuje v poslednej dobe jednotky ns a u úzkopásmových HPM sú to stovky ns až desiatky µs. Pri súčasne obmedzenej hodnote dosahovaného vrcholového vyžiareného výkonu to však znamená i znižovanie celkovej vyžiarenej energie, ktorá v ničivých účinkoch mikrovlnových zdrojov predstavuje ďalší dôležitý parameter. Napriek jej znižovaniu (so skracovaním impulzu z jednotiek kJ na jednotky J) predstavujú širokopásmové (UWB) HPM najväčšie riziko z hľadiska použitia v úlohe útočnej zbrane, predovšetkým kvôli schopnosti pôsobiť na široké spektrum elektronických výrobkov s rôznymi vlastnosťami a rôznym stupňom zodolnenia. Celková

citlivosť (susceptibilita) elektronických zariadení súvisí s trendmi v technológii elektronických obvodov (znižovaním napájacieho napätia, znižovaním energetickej náročnosti prvkov a zvyšovaním pracovných kmitočtov do pásma jednotiek GHz).

V osemdesiatych rokoch 20. storočia sa mohli stať skutočnosťou koncepty známe zo štúdií a experimentov radarov počas druhej svetovej vojny. Boli splnené dva základné predpoklady na splnenie ich realizácie:

- bolo možné technicky realizovať zdroje produkujúce elektromagnetické impulzy vysokých výkonov (gigawatt),
- proces elektronizácie v ozbrojených silách ako aj celej spoločnosti spôsobil nevyhnutnú závislosť na činnosti miniatúrnych a citlivých elektronických obvodov.

Stále pokračujúca miniaturizácia a požiadavky na nižšiu energetickú náročnosť a tým nižšie napájacie napätie s čím ďalej tým viac využívanou technikou založenou na komerčných základoch (nie od začiatku špeciálne vyvíjanej pre vojenské použitie) robí HPM zbrane viac a viac atraktívne vo vojenstve i v terorizme.

Výsledkom pôsobenia HPM zdrojov sú účinky dvojakého druhu:

- „soft kill“ – mäkké ničivé účinky pri ktorých sú znefunkčnené kritické prvky pričom teleso objektu pôsobenia zostáva väčšinou nepoškodené,
- „hard kill“ – fyzicky deštruktívne účinky s obvykle vysokým stupňom fyzického narušenia objektu pôsobenia.

Účinky HPM zdrojov na zvolené objekty závisia od mnohých faktorov. Hoci existuje jednoznačná základná teória rozoberajúca uvedenú problematiku, konkrétna realizácia so sebou prináša jedinečné obmedzenia. Vo všeobecnosti možno účinky v závislosti na vyžiarenej výkonovej hustote elektromagnetickej energie rozdeliť do nasledovných štyroch oblastí:

1. *Prehorenie* – fyzikálne zničenie elektronických obvodov;
2. *Zamrznutie* – dočasné znefunkčnenie pamäťových alebo ďalších číslicových obvodov v elektronickom systéme;
3. *Zarušenie* – krátkodobé znefunkčnenie mikrovlnových alebo iných RF obvodov (analógových obvodov) predovšetkým v prijímacích obvodov komunikačných, bezpečnostných systémoch a radaroch;
4. *Klamanie* – zavedenie klamlivých údajov do systému vedúcich k nesplneniu úlohy.

Jedným zo zdrojov vysokovýkonového elektromagnetického impulzu (High-Altitude Electromagnetic Pulse – HEMP) je jadrový výbuch. Podstata takéhoto impulzu je dostatočne známa a publikovaná [5].

V porovnaní s HEMP je HPM energia rozložená v kratších vlnových dĺžkach a teda na vyšších frekvenciách v dôsledku čoho je zvýšená efektívnosť účinkov voči elektronickým systémom a zároveň je sťažená ochrana proti takýmto zdrojom. Mechanicky jednoduchý HPM systém, pracujúci na princípe chemickej reakcie s usmerneným účinkom pomocou špeciálnej antény môže napríklad znefunkčniť výpočtovú techniku na vzdialenosť niekoľkých stoviek metrov až jednotiek kilometrov. Zároveň treba poznamenať, že HPM výkonový impulz s výkonom rádovo MW môže za určitých okolností vážne poškodiť zdravie človeka.

KRITÉRIÁ EMS A METÓDY ICH MERANIA

Pri zisťovaní EMS určitého technického systému je potrebné vždy dopredu poznať či stanoviť kritérium jeho elektromagnetickej odolnosti, t.j. definované medze narušenia jeho funkcií. Všeobecne môžu byť tieto medze definované kvantitatívne alebo kvalitatívne.

Kvantitatívna medza odolnosti je stanovená ako dosiahnutie určitej hodnoty (určitých hodnôt) vybranej veličiny (veličín). Používa sa najmä v etape vývoja elektronického zariadenia, kedy zisťujeme veľkosť a tvar rušivých signálov vo vybraných bodoch zapojenia. Analyticky či empiricky potom stanovíme takú hodnotu sledovanej veličiny, ktorá by napr. pri číslicovom zariadení práve ešte nemala vyvolať neželanú zmenu užitočného signálu logických obvodov (t.j. neželanú zmenu ich stavu). Takto určená hodnota je potom považovaná za kritérium EM odolnosti pre všetky zariadenia daného typu.

Pre bežného užívateľa elektronického zariadenia sa však častejšie užíva systémového prístupu založeného na stanovení kvalitatívneho (funkčného) kritéria elektromagnetickej odolnosti, ako posúdenia zmeny prevádzkového stavu či ovplyvnenie funkčnosti daného zariadenia. Funkčná porucha je definovaná ako zmena prevádzkovej spôsobilosti skúšaného zariadenia, t.j. zhoršenie jeho funkcie v priebehu skúšky či ako dôsledok skúšky odolnosti. Pri tom sa rozdeľujú tri základné funkčné kritériá:

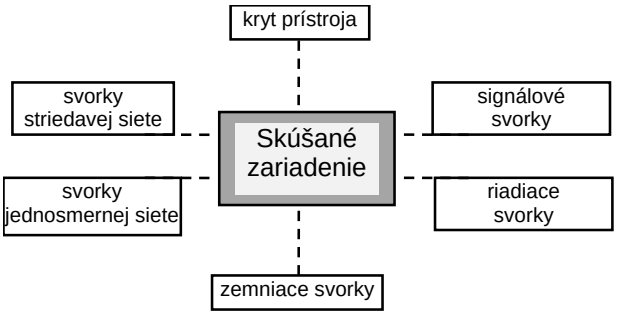
- Funkčné kritérium A – zariadenie musí v priebehu skúšky pokračovať vo svojej činnosti podľa svojho určenia. Nie je dovolené žiadne zhoršenie činnosti zariadenia či strata jeho funkcie
- Funkčné kritérium B – zariadenie musí po skončení skúšky pokračovať vo svojej činnosti podľa svojho určenia. V priebehu skúšky je dovolené zhoršenie činnosti zariadenia, nie je však dovolená zmena aktuálneho prevádzkového stavu zariadenia ani zmena dát v pamäti. Po skončení skúšky nie je dovolené žiadne zhoršenie činnosti zariadenia či strata jeho funkcie
- Funkčné kritérium C – je dovolená dočasná strata funkcie zariadenia za predpokladu, že sa táto funkcia po skončení skúšky odolnosti obnoví sama, alebo môže byť obnovená činnosťou riadiaceho systému, alebo zásahom operátora podľa špecifikácie v návode na použitie zariadenia.

V normatívnych predpisoch je často uvádzané ešte ďalšie funkčné kritérium, ktoré je charakterizované nevratnou stratou funkcie skúšaného zariadenia, jeho poškodením či zničením.

Základom každej skúšky EM odolnosti elektronického prístroja či zariadenia je jeho vloženie do vhodného EM prostredia. Najprirodzenejšie by teda bolo posudzovať odolnosť v tom prostredí, v ktorom dané zariadenie pracuje, príp. bude pracovať. Takáto skúška má však zásadnú nevýhodu v tom, že reálne prevádzkové EM prostredie je časovo náhodne premenné a nie je možné v ňom teda zaistiť reprodukovateľnosť nameraných výsledkov. Preto sa ku skúškam odolnosti používa nie skutočné, ale umelo vytvorené EM prostredie, ktoré je presne (a tým reprodukovateľne) definované najmä z hľadiska:

- obvodového, skupinového a priestorového usporiadania testovacieho (meracieho) pracoviska,
- kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov simulátora EM rušenia,
- prevádzkového stavu a nastavenia skúšaného systému, prístroja či zariadenia.

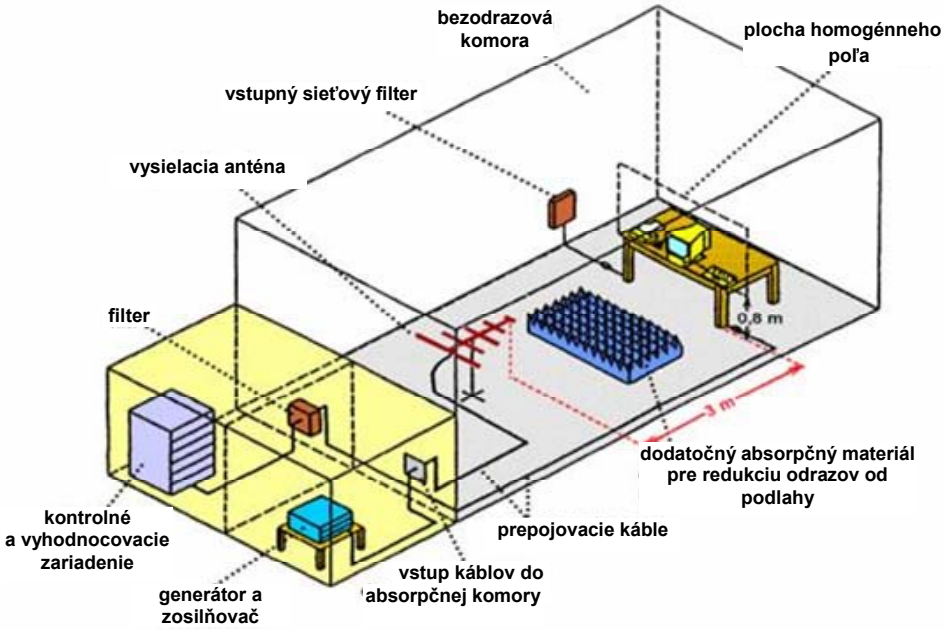
Pre realizáciu skúšok EM odolnosti je rovnako dôležité stanoviť možné vstupy rušivých signálov do skúšaného zariadenia. Podľa medzinárodných noriem je takto chápaný vstup definovaný ako konkrétne rozhranie daného zariadenia s vonkajším EM prostredím. Základné typy vstupov sú uvedené na obrázku 2, pričom sa predpokladá, že tieto vstupy môžu byť viacnásobné.



Obr. 2 Základné typy vstupov rušivých signálov do zariadenia

Skúšky odolnosti v najčastejšie používanom frekvenčnom rozsahu 80 MHz až 1000 MHz popisuje slovenská norma STN EN 61000-4-3. Uvedená norma predpisuje v pásme 80 až 1000 MHz skúšobné úrovne intenzity elektrického poľa 1, 3, 10 a 30 V/m, príp. vyššie podľa požiadavky výrobcu. Úrovne zodpovedajú efektívnym hodnotám intenzity poľa harmonického nemodulovaného signálu. Pre skúšku odolnosti je však tento signál amplitúdovo modulovaný do hĺbky 80 % harmonickým napätím 1 kHz. Amplitúdová modulácia vlnou 1 kHz je realizačne jednoduchá, univerzálna a čo do výsledkov skúšok odolnosti aspoň tak prísna ako iné typy modulácií, napr. impulzných.

Základným princípom skúšok odolnosti voči vyžarovanému vf elektromagnetickému poľu je ožarovanie skúšaného objektu príslušnými úrovňami poľa pomocou vhodných antén. Pretože potrebná intenzita budených skúšobných polí dosahuje až niekoľko desiatok V/m pri frekvenciách siahajúcich do oblasti GHz pásiem, odporúča sa meranie prednostne vykonávať v tienených absorpčných priestoroch. Tým sa jednak odstráni vplyv vonkajších polí na skúšaný objekt, jednak sa chráni obsluhujúci personál a blízke elektronické meracie a vyhodnocovacie zariadenia pred vplyvom silného skúšobného signálu. Tieto zariadenia sa zásadne umiestňujú do samostatnej EM tienenej miestnosti mimo meracej absorpčnej komory. Príklad realizácie skúšobného pracoviska EMS je na obrázku 3.



Obr. 3 Nákres skúšobného pracoviska EMS

Základným problémom doskových vedení ako antén pre skúšky EMS je ich vyžarovanie bočnými otvorenými stenami do okolitého priestoru. Okrem toho, že rozptylové pole na okrajoch dosiek spôsobuje nehomogénnosť testovacieho poľa a obmedzuje tak možnú veľkosť skúšaného objektu, môže toto vyžarovanie – vzhľadom k vysokým úrovniam generovaných polí – byť nebezpečné pre obsluhujúci personál aj pre blízke meracie elektronické zariadenia. Pri skúškach EMS sa preto doskové vedenie pozdĺž otvorených strán obkladá panelmi z absorpčného materiálu.

Prakticky dokonalé riešenie uvedeného problému ponúkajú tzv. skúšobné komory TEM umožňujúce generovať transverzálne homogénne pole bez neželaného vyžarovania do okolia. Základným obmedzovacím faktorom skúšobných komôr TEM v oblasti veľmi vysokých frekvencií je ich nedokonalé impedančné prispôsobenie na týchto frekvenciách a s tým spojený vznik neželaných rezonancií. Tieto javy je možné odstrániť napr. čiastočným obložením kovových stien vnútorného priestoru komory absorpčným materiálom. Na tomto princípe vznikla v posledných rokoch nová konštrukcia skúšobnej komory, tzv. meracia komora GTEM (Gigahertz-Transversal-Electromagnetic Cell). Na obrázku 4 je bočný pohľad na GTEM komoru, umiestnenú v laboratóriu HPM katedry elektroniky AOS v Liptovskom Mikuláši.

Obr. 4 Vonkajší pohľad na GTEM meraciu komoru

Komora je tvorená uzatvoreným priestorom v tvare dlhého pyramídovo sa rozširujúceho úseku koaxiálneho vedenia pravouhlého prierezu s nesymetricky umiestneným vnútorným páskovým vodičom. Vrcholový uhol pyramídového koaxiálneho vedenia je cca 15°, jeho charakteristická impedancia je pozdĺž celej dĺžky konštantná a rovná 50 Ω. Širokopásmové impedančné prispôsobenie komory GTEM na vysokých frekvenciách zaisťujú absorpčné ihlany tvaru A na jej na jej čelnej strane, zatiaľ čo bezodrazovosť v oblasti nižších frekvencií je zaistená vnútornou odporovou sieťou $R = Z_0$ na konci vnútorného páskového vodiča – nazývaného aj septum. V komore GTEM sa tak šíri postupná EM vlna s mierne guľovou čelnou vlnoplochou. Podľa typu budiaceho generátora ZG je možné vytvárať skúšobné harmonické polia s intenzitou 200 V/m vo frekvenčnom pásme do niekoľko GHz a impulzové polia s veľkosťou až niekoľko kV/m.

Hlavnými výhodami komôr GTEM je vysoká priestorová homogénnosť simulovaného poľa v širokom pásme frekvencií, prakticky nulové vyžarovanie zo skúšobného priestoru von a možnosť konštruovať ich aj pre skúšanie pomerne veľkých objektov s objemom až niekoľko m^3. Pokiaľ nepresiahne veľkosť skúšaného objektu asi 1/3 výšky skúšobného priestoru, je maximálna priestorová nehomogénnosť elektrického poľa najviac 1 dB s maximálnou frekvenčnou zmenou 3 dB v pásme 0 až 1 GHz. Komory GTEM sa často konštruujú vo forme zostavených modulov, ktoré umožňujú zväčšiť veľkosť skúšobného priestoru pridaním ďalšieho pyramídového úseku.

ZÁVER

Posledné desaťročie je charakteristické masovým využitím informačných, komunikačných a senzorových systémov, ktoré sa uplatňujú vo vojenských i civilných systémoch. Jedná sa hlavne o informačné systémy štátnych riadiacich štruktúr, prvky ekonomickej infraštruktúry, prvky prepravnej a komunikačnej infraštruktúry, informačné a komunikačné systémy využívané populáciou v dennej bežnej praxi a v neposlednom rade i armádne zbraňové, informačné a komunikačné systémy. Uvedené systémy sú však citlivé na účinky výkonového elektromagnetického impulzu čo viedlo k vytvoreniu nových strategických doktrín s využitím elektromagnetických zbraní s ničivými účinkami na uvedené prvky a systémy. Posledné vojenské konflikty ukázali ich veľmi efektívne využitie. Správne nezabezpečené a nechránené elektronické systémy sa môžu stať ľahkým terčom predpokladaného či už vojenského, alebo teroristického útoku, ku ktorému je možné zneužiť i existujúce prostriedky. Tento článok môže prispieť k všeobecnému pochopeniu daného problému na úrovni širšej odbornej verejnosti.

BIBLIOGRAFICKÉ ODKAZY

1. Orosz. Š.: *Vybrané kapitoly z elektromagnetickej kompatibility*. Bakalárska práca. Akadémia ozbrojených síl gen. M. R. Štefánika, Liptovský Mikuláš, 2008

2. Šostronek, M.: Spôsoby odstraňovania rušenia v nn systémoch. In: *Zborník prednášok zo XVII. odborného seminára „Bezpečnosť práce na elektrických inštaláciách a elektrických zariadeniach“*, 26.2.2009, Liptovský Mikuláš, SES Liptovský Mikuláš, 2009, str. 25-34

3. Shifler, D., Statom, T.K., Hussey, T.W., Zhou, O., Mardahl, P.: High-Power Microwave Sources. In: *Barker, R. Modern Microwave and Milimeter-Wave Power Electronics*, John Wiley & Sons, Inc., IEEE Press, 2005

4. Nebus, F. a kol.: *Ochrana proti HPM zbraniam.* Priebežná správa výskumného projektu ŠPP 425_05-RO02_R201-240, Akadémia ozbrojených síl, Liptovský Mikuláš, 2008

5. Wilson, C.: *High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and High Power Microwave (HPM) Devices: Threat Assessments*. CRS report RL32544, Washington, 2008