



Bakalářská práce

Specifikace testů EMC pro automobily

Studijní program:

B0714A270001 Mechatronika

Autor práce:

Martin Valenta

Vedoucí práce:

Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Specifikace testů EMC pro automobily

| | |
|----------------------------|--|
| <i>Jméno a příjmení:</i> | Martin Valenta |
| <i>Osobní číslo:</i> | M21000057 |
| <i>Studijní program:</i> | B0714A270001 Mechatronika |
| <i>Zadávající katedra:</i> | Ústav mechatroniky a technické informatiky |
| <i>Akademický rok:</i> | 2023/2024 |

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku testů EMC dle základních norem ČSN EN 61000-4-xx a norem EMC pro automobily (E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.9/Rev.5, Předpis č. 10).
2. Porovnejte rozdíly mezi jednotlivými typy zkoušek.
3. Navrhněte přípravek pro jeden z testů EMC pro výrobky pro automobilový průmysl (např. testování ESD).

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 30 až 40 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] PAUL, Clayton R. *Introduction to electromagnetic compatibility*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley, 2006. ISBN 0-471-75500-1.
- [2] Normy řady ČSN EN 61000-4-xx,
- [3] Norma EMC pro automobily: E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.9/Rev.5, Předpis č. 10

Vedoucí práce: Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce: 12. října 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 14. května 2024

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.
garant studijního programu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Specifikace testů EMC pro automobily

Abstrakt

Tato bakalářská práce se podrobně věnuje specifikacím a metodám testů elektromagnetické kompatibility (EMC) v automobilovém průmyslu a porovnává je s testy v obecném průmyslu. Teoretická část se zabývá obecně EMC, ale především je zaměřena na analýzu metod měření a typů zkoušek. Praktická část potom vychází z teoretické a popisuje návrh a konstrukci testovacího přípravku určeného pro specifickou zkoušku EMC, včetně provedení několika demonstrativních měření podle automobilových norem v laboratoři EMC TUL.

Klíčová slova: EMC, EMI, EMS, ESD, automobilový průmysl, zkoušky, EHK OSN č. 10

Abstract

This bachelor thesis extensively addresses the specifications and methods of electromagnetic compatibility (EMC) testing in the automotive and compares them with tests in the general industry. The theoretical part generally deals with EMC but is primarily focused on analyzing measurement methods and types of tests. The practical part, based on the theoretical part, describes the design and construction of a testing tool designed for a specific EMC test, including the performance of several demonstrative measurements according to automotive standards in the EMC laboratory of TUL.

Keywords: EMC, EMI, EMS, ESD, automotive, tests, UNECE R10

Poděkování

Zpočátku bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Lubomíru Slavíkovi, Ph.D za skvělý přátelský přístup, vstřícnost při vykonávání práce a také za velké množství času stráveného v laboratoři EMC TUL. Dále bych ještě poděkoval panu Ing. Zoltánovi Dolenskému za poskytnutí zařízení pro praktické testování.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Seznam obrázků | 10 |
| Seznam tabulek | 11 |
| Seznam zkratk | 12 |
| Úvod | 13 |
| 1 Popis elektromagnetické kompatibility | 14 |
| 1.1 Původ a smysl EMC | 14 |
| 1.2 Základní řetězec EMC | 16 |
| 1.3 Rozdělení EMC | 16 |
| 1.3.1 Biologické systémy | 17 |
| 1.3.2 Technické systémy | 17 |
| 1.4 Oblasti EMC | 17 |
| 1.4.1 Elektromagnetická interference | 18 |
| 1.4.2 Elektromagnetická susceptibilita | 18 |
| 1.5 Důležité pojmy EMC | 19 |
| 2 Rušení | 20 |
| 2.1 Zdroje rušení | 20 |
| 2.2 Rušivé signály | 21 |
| 2.3 Šíření rušivých signálů | 22 |
| 2.3.1 Šíření vedením | 22 |
| 2.3.2 Šíření prostřednictvím elektromagnetické vazby | 22 |
| 2.3.3 Šíření vyzařováním | 22 |
| 3 Legislativa, organizace a normy | 23 |
| 3.1 Rozdělení norem | 24 |
| 3.1.1 Základní normy (Basic Standards) | 24 |
| 3.1.2 Kmenové normy (Generic Standards) | 24 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.1.3 | Produktové normy (Product Standards) | 24 |
| 4 | Měření a testování EMC | 25 |
| 4.1 | Měření rušivých signálů (EMI) | 25 |
| 4.1.1 | S umělou sítí | 25 |
| 4.1.2 | Napětovou sondou | 26 |
| 4.1.3 | Proudovou sondou | 26 |
| 4.1.4 | Absorpčními kleštěmi | 27 |
| 4.1.5 | Pomocí antén | 28 |
| 4.2 | Testování odolnosti (EMS) | 28 |
| 4.2.1 | Funkční kritéria | 28 |
| 4.2.2 | Zkušební signály | 29 |
| 4.2.3 | Druhy zkoušek | 30 |
| 4.3 | Značka CE | 30 |
| 5 | Automobilový průmysl | 31 |
| 5.1 | Úvod | 31 |
| 5.2 | Legislativa automotive | 32 |
| 5.2.1 | Předpis EHK OSN č. 10 | 33 |
| 5.2.2 | Norma ISO 10605 | 35 |
| 5.2.3 | Norma CISPR 25 | 36 |
| 5.3 | E - značka | 36 |
| 5.4 | Testování a měření EMC v automobilovém sektoru | 37 |
| 5.4.1 | Měření širokopásmového elektromagnetického rušivého vyzařování ESA | 37 |
| 5.4.2 | Měření úzkopásmového rušení vyzařovaného prostřednictvím ESA | 39 |
| 5.4.3 | Testování odolnosti ESA vůči elektromagnetickému záření | 40 |
| 5.4.4 | Měření rušení harmonických generovaných AC napájecími vodiči z ESA | 41 |
| 5.4.5 | Měření vyzařování změn napětí, výpadků napětí a flikru na AC napájecích vodičích z ESA | 41 |
| 5.4.6 | Měření vyzařování vysokofrekvenčního vedeného rušení na AC nebo DC napájecích vodičích z ESA | 41 |

| | | |
|------------------|---|-----------|
| 5.4.7 | Měření vyzařování vysokofrekvenčního rušení šířeného vedením generovaného ESA na síti a telekomunikačním přístupu | 42 |
| 5.4.8 | Testování odolnosti vozidel a ESA vůči rychlým elektrickým přechodným jevům nebo skupinám impulzů v AC a DC napájecích vodičích | 42 |
| 5.4.9 | Testování odolnosti vozidel a ESA vůči rázovým vlnám v AC a DC napájecích vodičích | 44 |
| 5.4.10 | Testování odolnosti zařízení vůči ESD | 45 |
| 5.5 | Rozdílnosti v certifikaci mezi zařízeními pro obecný průmysl a zařízeními pro automobilový průmysl | 46 |
| 6 | Praktická část | 47 |
| 6.1 | Přípravek pro testování zařízení na odolnost vůči ESD | 47 |
| 6.1.1 | Funkce přípravku | 48 |
| 6.2 | Vlastní měření | 48 |
| 6.2.1 | Zkouška odolnosti BMS jednotky vůči ESD | 49 |
| 6.2.2 | Zkouška odolnosti BMS jednotky vůči EFT/B v datových vodičích | 52 |
| 6.2.3 | Měření rušení šířeného vyzařováním z BMS jednotky v komoře TEM | 53 |
| | Závěr | 56 |
| | Použitá literatura | 57 |
| Příloha A | Výkres přípravku | 60 |

Seznam obrázků

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Havárie na letadlové lodi U.S.S. Forrestal [2] | 15 |
| 1.2 | Základní řetězec EMC | 16 |
| 1.3 | Grafika dělení EMC | 18 |
| 1.4 | Definice úrovní a mezí EMS a EMI | 19 |
| 2.1 | Rozdělení zdrojů rušení | 20 |
| 4.1 | Blokové schéma umělé sítě LISN [1] | 25 |
| 4.2 | Schéma měření proudovou sondou (MR - měřič rušení; PS - proudová sonda; ZO - zkoušený objekt) [1] | 27 |
| 4.3 | Absorpční kleště [1] | 27 |
| 4.4 | Značka CE a její porovnání s China Export [6] | 30 |
| 5.1 | Diagram aplikovatelnosti předpisu na ESA [9] | 34 |
| 5.2 | E-značka [9] | 36 |
| 5.3 | Maximální meze širokopásmového rušivého vyzařování | 38 |
| 5.4 | Maximální meze úzkopásmového rušivého vyzařování | 39 |
| 5.5 | Zkušební sestava pro zkoušku odolnosti vůči EFT/B [19] | 43 |
| 5.6 | Jeden normalizovaný přechodný impulz [19] | 43 |
| 6.1 | Popis hlavních součástí přípravku | 48 |
| 6.2 | Generátor ESD od EMTEST s ostrým hrotem pro kontaktní výboj | 50 |
| 6.3 | Testovací sestava pro zkoušku odolnosti vůči ESD při měření | 51 |
| 6.4 | Generátor EFT/B od EMTEST s nastavenými hodnotami | 52 |
| 6.5 | Testovací sestava pro zkoušku odolnosti vůči EFT/B při měření | 53 |
| 6.6 | Komora GTEM | 54 |
| 6.7 | BMS jednotka umístěná na manipulátoru komory | 54 |
| 6.8 | Graf z měření vyzařovaného rušení (červená křivka - mez rušení pro vyzařování; oranžová křivka - naměřená úroveň vyzařovaného rušení) | 55 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Frekvenční spektra a způsoby šíření rušení ze zdrojů | 21 |
| 5.1 | Příklady norem, na které se předpis EHK OSN č. 10 odkazuje [8] . . . | 33 |
| 6.1 | Soupis přístrojů | 49 |

Seznam zkratek

| | |
|----------------|--|
| TUL | Technická univerzita v Liberci |
| EMC | Elektromagnetická kompatibilita |
| EMI | Elektromagnetická interference |
| EMS | Elektromagnetická susceptibilita |
| ESD | Electrostatic discharge (Elektrostatický výboj) |
| IEC | International Electrotechnical Commission (Mezinárodní elektrotechnická komise) |
| ISO | International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci) |
| ČSN | Česká státní norma |
| EN | Evropská norma |
| CISPR | Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (Mezinárodní výbor pro radiové rušení) |
| AN | Artificial network (Umělá síť) |
| LISN | Line impedance stabilizing network (Umělá zátěž vedení) |
| CE | Certified European (Evropská certifikace) |
| ESA | Electronic sub-assembly (Elektronická podsestava/komponenta) |
| EHK OSN | Evropská hospodářská komise Spojených národů |
| DUT | Device under test (Testované zařízení) |
| ALSE | Absorber-lined shielded enclosure (Stíněná komora s absorbéry) |
| OATS | Open area test site (Otevřený testovací prostor) |
| TEM | Transverse electromagnetic cell (Příčná elektromagnetická buňka) |
| EFT/B | Electrical fast transients/bursts (Elektrické rychlé přechodné jevy/skupiny impulzů) |
| REESS | Rechargeable energy storage system (Dobíjecí systém s uskladněním energie) |
| BMS | Battery management system |

Úvod

V dnešní době, kdy dochází k rychlému technologickému pokroku a počet elektrických a elektronických prvků, zařízení a systémů neustále roste, se klíčovým aspektem pro zajištění jejich bezpečného a spolehlivého provozu stává právě EMC. Tato bakalářská práce se zaměřuje na studium a analýzu norem a zkoušek EMC, a to zejména těch, které se aplikují v automobilovém průmyslu.

Teoretická část bakalářské práce nejprve obecně řeší problematiku elektromagnetické kompatibility a rušení. Poté se zaměřuje na tuto problematiku specificky v automobilovém průmyslu. V této části jsou srovnány metody zkoušek aplikované na obecná elektrická zařízení a zařízení určená pro automobily, přičemž ke srovnání jsou využity příslušné normy definující požadavky a metodiky pro testy.

Praktická část práce je věnována návrhu přípravku pro testování odolnosti vůči elektrostatickému výboji (ESD) podle odpovídajících norem. Finálním výstupem bakalářské práce by mělo být provedení několika demonstrativních zkoušek dle norem pro automobilový průmysl, přičemž při zkoušce odolnosti vůči ESD by se využil právě výše zmíněný navržený přípravek.

1 Popis elektromagnetické kompatibility

Počet elektrických zařízení, přístrojů a systémů, které člověka každodenně obklopují velice rychle přibývá a spolu s nimi přibývá i nežádoucí elektromagnetické rušení. Toto rušení v nejlepších případech nemusí mít vůbec žádný vliv na okolní elektronické komponenty. V horších případech může rušení omezit jejich správnou funkčnost nebo může vést až k úplnému selhání, což je potřeba řešit s určitým předstihem, a to zavedením vhodných opatření pro správný a bezproblémový chod všech přístrojů, které mají fungovat v určitém prostředí.

Schopnost elektrických zařízení vzájemně fungovat s dalšími technickými a biologickými systémy ve sdíleném prostoru, aniž by došlo k jakémukoliv omezení provozuschopnosti je označována jako elektromagnetická kompatibilita.

1.1 Původ a smysl EMC

Samotný vědecký obor zabývající se elektromagnetickou kompatibilitou vznikl kolem 60. let minulého století v USA. Úplně prvním průmyslem, který byl postižen touto problematikou byl zbrojní, a to z důvodu vysoce vyspělé techniky, kterou americká armáda v této době disponovala. Na nedodržení EMC se v té době i několikrát doplatilo.

Jedním ze zakladatelů tohoto oboru je H. M. Schlicke, ten v roce 1968 dobře charakterizoval problematiku EMC slovy: „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.” Tento obor sice vznikl teprve nedávno, ale postupem času se stává čím dál tím více populárnější záležitostí, kterou není možné opomíjet. V odstavcích níže jsou případy, které vycházejí z nedodržení EMC. [1]

Dost pravděpodobně je nejznámějším případem katastrofa, která nastala roku 1967, kdy ve Vietnamu řádila válka. Na americkou letadlovou loď U.S.S. Forrestal přistával stíhací letoun, který byl zasažen signálem z radaru lodi, to zapříčinilo vznik elektromagnetického rušení, které spustilo střelbu kulometů tohoto letounu. Naneštěstí byl zasažen natankovaný a vyzbrojený letoun, který parkoval na palubě lodi a došlo k výbuchům a kritickému poškození letadlové lodi a letounů na její palubě. Tato katastrofa si vzala 134 lidských životů a dalších 161 lidí z ní vyvázlo se zraněními. [2][3]

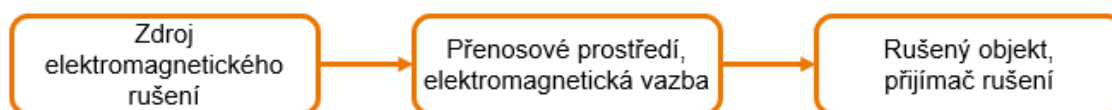


Obrázek 1.1: Havárie na letadlové lodi U.S.S. Forrestal [2]

Dalším případem je havárie bojového letounu Tornado v roce 1984 u německého Mnichova. Důvodem byl až příliš těsný průlet letounu nad vysílačem s vysokým výkonem, který svým vysíláním elektromagnetického vlnění vyrušil elektronický řídicí systém letounu, což vedlo k poruše automatického systému řízení a následnému zřícení letadla. [1][3]

1.2 Základní řetězec EMC

Jestliže je potřeba zkoumat kompatibilitu určitého systému nebo zařízení, tak je nejvýhodnější začít právě s tímto řetězcem. I když je řetězec vlastně jenom teoretický model, tak poskytuje dobrou představu o celkovém uspořádání EMC systému. V realu totiž může nastat situace, kdy objekt může působit jako zdroj rušení a zároveň může být i rušen jiným objektem. Souvislosti mezi články řetězce jsou tedy mnohem více komplexnější než se zdá.



Obrázek 1.2: Základní řetězec EMC

Nepostradatelnou část řetězce tvoří zdroj rušení. U zdroje se hlavně zjišťuje, jak rušení vzniká a jakou intenzitou působí. Zdroje se rozdělují do dvou skupin, a to zdroje přírodní, do nichž patří Slunce a další procesy v atmosféře. A zdroje umělé, které jsou vytvořeny člověkem. K umělým patří například motory, domácí spotřebiče a počítače.

Ze zdroje cestuje rušení přes druhou část řetězce, jenž je tvořena elektromagnetickým přenosovým prostředím a vazbou. Prostředím může být například vzdušný prostor, zemnění, napájecí vedení nebo stínění. Vazby jsou popisovány v kapitole 2.3.2.

Koncovým článkem řetězce je objekt nebo přijímač rušení, do kterého doputuje rušení ze zdroje přes přenosové prostředí nebo určitou vazbu. Tato část se věnuje chování objektu přijímajícího elektromagnetické rušení.

1.3 Rozdělení EMC

EMC se rozděluje na dvě základní skupiny: EMC biologických systémů a EMC technických systémů. Níže jsou obě skupiny probrány podrobněji.

1.3.1 Biologické systémy

Zkoumá elektromagnetické jevy životního prostředí, společně s nimi i jejich vliv na člověka a další živočišné druhy. Při přímém vystavení elektromagnetickému poli záleží na čase, po který mu byl člověk či živý organismus vystaven, dále na vlastnostech pole a vlastnostech daného jedince. Toto téma zkoumají výzkumná lékařská zařízení. Soustředí se především na vyhodnocování imunity člověka elektromagnetickým jevům. [1]

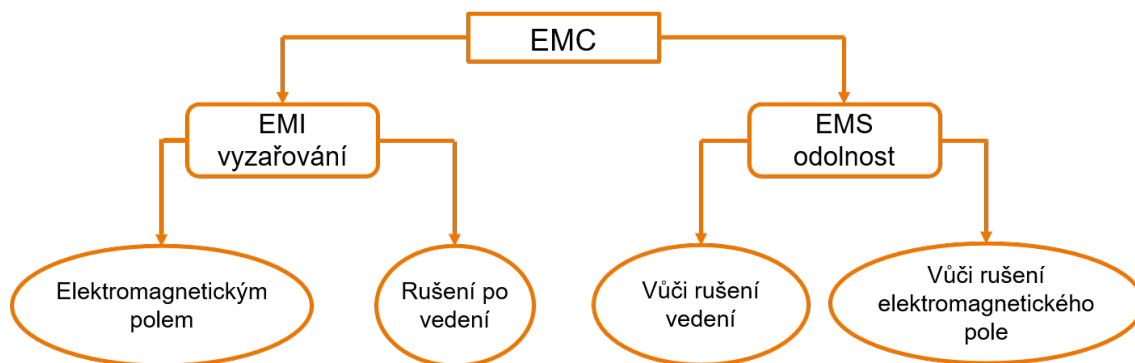
Účinky elektromagnetických polí na živé organismy se rozdělují do dvou skupin. První jsou tepelné účinky, které jsou vyvolány působením polí o vysokých frekvencích, které ohřívají biologické tkáně. Druhou skupinou jsou účinky netepelné. Ty vznikají při časově delším vystavení člověka elektromagnetickým polím o nižších výkonech. Netepelné účinky působí například na centrální nervový systém, krevní oběh a imunitní systém. [4]

1.3.2 Technické systémy

Tato skupina se primárně zaměřuje na interakci a vzájemné ovlivňování mezi elektromagnetickým polem a technickým zařízením, a také na pozorování vlivu technického zařízení na okolní prostředí. Jak biologické, tak technické systémy se opírají o základní řetězec EMC (kap. 1.2), o kterém byla zmínka již dříve.

1.4 Oblasti EMC

Dvěmi základními oblastmi EMC jsou elektromagnetická interference (EMI), což je elektromagnetické rušení a elektromagnetická susceptibilita (EMS), která je odolností (imunitou) vůči elektromagnetickému rušení.



Obrázek 1.3: Grafika dělení EMC

1.4.1 Elektromagnetická interference

EMI je proces, kdy se signál vytvořený zdrojem rušení přenáší ať už přenosovým prostředím nebo kteroukoliv z elektromagnetických vazeb do elektrických zařízení a systémů, které jsou postiženy právě tímto rušivým signálem. Z této příčiny může uvnitř nich nastat k ovlivnění jejich běžného chodu.

Interference je zaměřena především na rozpoznávání zdrojů produkujících rušení, rozpoznávání parazitních přenosových prostředí či vazeb, dále také na popis a měření šumů. Oblast EMI se tyto příčiny rušení snaží eliminovat.

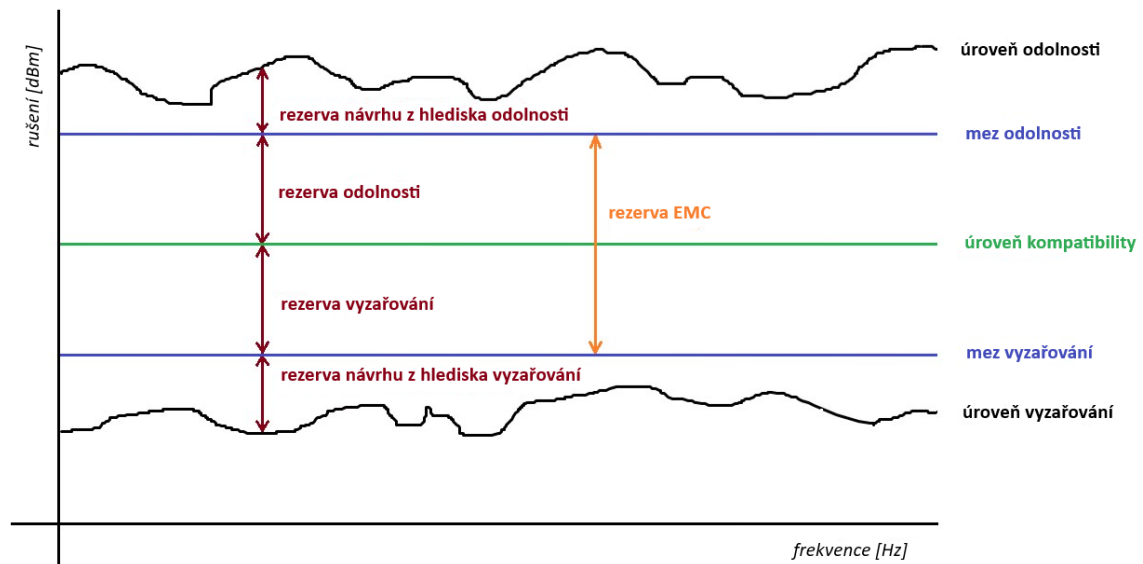
1.4.2 Elektromagnetická susceptibilita

EMS znamená schopnost elektrického objektu a systému fungovat, aniž by na něm vznikla nějaká závada, anebo fungovat podle požadavků v prostředí, ve kterém je přítomno i elektromagnetické rušení.

EMS se zabývá zlepšováním odolnosti vůči parazitnímu signálu, a to zavedením příslušných technických prvků. Jde tedy hlavně o eliminaci důsledků rušení.

1.5 Důležité pojmy EMC

Všechna elektronická zařízení jsou jak zdrojem, tak přijímačem elektromagnetického rušení. Na obr. 1.4 jsou důležité pojmy, vztahující se k EMI a EMS těchto zařízení.



Obrázek 1.4: Definice úrovní a mezí EMS a EMI

Úroveň vyzařování (interference) znamená rušení, které je při běhu konkrétního zařízení samo produkováno tímto zařízením. Rušení se udává se v jednotkách dBm v závislosti na frekvenci. Mezi vyzařování se rozumí maximální povolená úroveň vyzařování konkrétního zařízení. Rezerva návrhu z hlediska EMI je rozdíl mezi těmito dvěma úrovněmi.

Úroveň odolnosti (susceptibility) znamená maximální úroveň rušení vyzařovaného jinými zdroji působící přímo na konkrétní zařízení. Na této úrovni se nemůže stát, že nastane narušení chodu nebo poničení zařízení. Mez odolnosti je na rozdíl od meze vyzařování minimální přípustná úroveň odolnosti. Rezerva návrhu z hlediska EMS udává rozdíl těchto úrovní.

Rezerva EMC udává rozdíl meze odolnosti a meze vyzařování. Úroveň kompatibility znamená nejvyšší povolenou úroveň souhrnného rušení, které bude působit na elektrické přístroje za daných podmínek. Rezervy vyzařování a odolnosti jsou rozdíly meze vyzařování a meze odolnosti vůči kompatibilní úrovni. [1][5]

2 Rušení

Jev, který znamená jakékoliv nežádoucí ovlivnění nebo omezení normální funkce elektrického zařízení, které je způsobeno elektromagnetickými vlnami. Tyto vlny mohou být vytvořeny kterýmkoliv elektrickým zařízením, či přirozeným způsobem (blesk). Zařízení a systémy, které produkují mnohonásobně více tohoto rušení než sami přijímají jsou označovány jako zdroje nebo vysílače elektromagnetického rušení (interferenční zdroje).

2.1 Zdroje rušení

Rozdělují se podle několika odlišných kritérií. Druhy zdrojů jsou na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Rozdělení zdrojů rušení

Přírodní se vytvářejí samovolně a nelze jejich vzniku zabránit, zatímco umělé jsou vytvořeny člověkem a lze je ovlivnit. Další dvojicí jsou funkční a parazitní, funkční jsou výstupní funkcí nějakého systému a zároveň mohou ovlivňovat systémy jiné. Parazitní vznikají při generování nežádoucího rušení zdrojem.

Rozdělení zdrojů rušení lze provést i podle průběhu rušivých signálů. Impulzní zdroje produkují impulzy nebo přechodné jevy. Spojité produkují rušení nepřetržitě bez přerušení. Kvazi-impulzní zdroje vytváří spojité i impulzní rušení.

Šířka frekvenčního spektra rušivého signálu závisí na jeho časovém průběhu, což je důležité pro zvolení náležitých opatření na potlačení rušení. Dle šířky spektra se rozděluje rušení na dvě skupiny. Úzkopásmové rušení je tvořeno signály z televize a rozhlasu, zatímco širokopásmové rušení tvoří nezávisle na jejich průběhu v čase průmyslové zdroje rušivých signálů.

Další dělení závisí na způsobu šíření rušivého signálu. Všechny zdroje šíří rušení jak vedením, tak i vyzařováním (některé zdroje obou typů rušení jsou v tab. 2.1). Obvykle avšak jeden ze způsobů přenosu dominuje.

| Zdroj rušení | Frekvenční spektrum | Způsob šíření rušení |
|-----------------------|---------------------|----------------------|
| Rtuťové výbojky | 0,1 Hz - 1 MHz | vedení |
| Zářivky | 0,1 Hz - 3 MHz | vedení |
| | 100 Hz - 3 MHz | vyzařování |
| Síťové vypínače | 0,5 Hz - 25 MHz | vedení |
| Spínané síťové zdroje | 0,1 Hz - 30 MHz | vedení |
| | 0,1 Hz - 30 MHz | vyzařování |
| Výkonové spínače | 10 Hz - 20 MHz | vedení |
| | 0,1 Hz - 20 MHz | vyzařování |
| Klopné obvody | 15 kHz - 400 MHz | vyzařování |

Tabulka 2.1: Frekvenční spektra a způsoby šíření rušení ze zdrojů

Poslední dva typy se dělí dle velikosti frekvence rušení: nízkofrekvenční, které se vyskytuje v rozsahu od 0 Hz do 10 kHz, a vysokofrekvenční, působící od 10 kHz do 400 GHz.

2.2 Rušivé signály

Šum znamená náhodně vzniklý rušivý signál, který doprovází nějaký elektrický stroj či zařízení při jeho činnosti. Šum působí hlavně na tvar užitečného signálu. Rušivý signál ve formě šumu bývá typicky periodický.

Impulzy mají na svou dobu působení poměrně velmi vysokou velikost. Vliv na užitečný signál mají impulzy takový, že se s ním překrývají, což se projevuje jako pozitivní nebo negativní špičky (peaky). Za jejich vytvoření nejčastěji mohou spínací procesy při kontaktním spínání elektrických obvodů či soustav.

Přechodné jevy představují náhle vznikající, jednorázové rušivé signály, které mají dobu trvání od řádu milisekund do řádu maximálně sekund. V energetické síti dochází ke vzniku těchto jevů vlivem nárazových změn jejího zatížení, způsobených spouštěním a vypínáním strojů o velkých výkonech.

2.3 Šíření rušivých signálů

Rušivé signály se od jejich zdroje mohou šířit třemi následujícími způsoby. Buď přenosovým prostředím, což znamená vedením nebo vyzařováním nebo některou z elektromagnetických vazeb.

2.3.1 Šíření vedením

Rušivé signály se při tomto jevu šíří přímo elektrickými vodiči. Typickými příklady jsou rušení šířící se prostřednictvím napájecích kabelů, datových kabelů nebo signálových vedeních. Příčinou jejich vzniku a šíření nejčastěji bývají elektrická zařízení s rychlými změnami v napětí a proudu, jako jsou přepínače nebo zdroje napájení.

2.3.2 Šíření prostřednictvím elektromagnetické vazby

Přenos z vysílače rušivých signálů do přijímače můžeme podrobněji zkoumat podle druhu přenosového prostředí nebo druhu vazby. Z fyzikálního hlediska se vazby rozdělují na galvanickou, kapacitní a induktivní.

2.3.3 Šíření vyzařováním

S tímto jevem se lze setkat při delších vzdálenostech mezi vysílačem a přijímačem rušení, kdy dochází k rušení prostřednictvím vyzářených elektromagnetických vln v okolním prostředí. Tento druh rušení může zahrnovat interferenci od blízkých vysílačů či různé průmyslové poruchy.

3 Legislativa, organizace a normy

Jelikož je legislativa poměrně zmatečná, tak je vhodné se před popisem metod měření rušení a testováním odolnosti s největšími základy evropské legislativy a normalizace seznámit. Nad všemi normami jsou postaveny **Směrnice EU**. Směrnice jsou legislativním aktem EU, které stanovují právní rámec a cíle, které mají členské státy dosáhnout. Normy potom poskytují technické podrobnosti a metody pro dosažení těchto cílů. Normy tedy slouží jako nástroj pro dosažení shody se směrnicemi.

Jednou z nejvýznamnějších mezinárodních organizací, která zastřešuje technické normy a předpisy nejen z oblasti EMC je **Mezinárodní elektrotechnická komise (IEC)**, pod kterou působí **Mezinárodní výbor pro radiové rušení (CISPR)**. CISPR patří k největším mezinárodním autoritám v EMC, jenž vydává normy zaměřené na rušení vyzařováním a vedením a na odolnost některých produktů. Organizace IEC spadá pod celosvětový normalizační proces, který je řízen **Mezinárodní organizací pro normalizaci (ISO)**.

Postupem času, kdy vzniká potřeba sjednotit a zharmonizovat velké množství různých norem a předpisů vzniká v Evropě systém jednotných norem - **Evropské normy (EN)**. EN jsou důležité pro jednotný evropský trh a spravují je tři standardizační organizace EU: CEN, CENELEC, ETSI. Evropské normy mohou přejímat světové mezinárodní normy a samotné jsou potom přejímány jako národní standardy členskými státy Evropské unie. V Česku se jedná o **České státní normy (ČSN)**, které jsou harmonizovány a přebírány jak z celosvětových, tak evropských norem.

3.1 Rozdělení norem

Nejběžnější rozdělení je do následujících tří skupin.

3.1.1 Základní normy (Basic Standards)

Základní normy nejsou určeny pro přímou aplikaci na konkrétní produkty. Definují základní principy, metodiky a celkově problematiku EMC. Stanovují základní všeobecné požadavky k dosažení kompatibility u širokého spektra produktů. Neobsahují žádná vyhodnocovací kritéria zkoušek ani dovolené meze pro odolnost a stejně tak rušení.

3.1.2 Kmenové normy (Generic Standards)

Poskytují obecné požadavky a testovací metody EMC pro různé skupiny produktů a zařízení, které pracují v určitých typech elektromagnetických prostředí. Tyto normy se pak často rozdělují podle určitých typů prostředí (např. průmyslová prostředí, obytná prostředí).

3.1.3 Produktové normy (Product Standards)

Vztahují se na konkrétní typy produktů nebo skupin produktů, pro které specifikují podrobné požadavky a metody testování elektromagnetické kompatibility. Musí být v souladu jak se základními, tak s kmenovými normami.

4 Měření a testování EMC

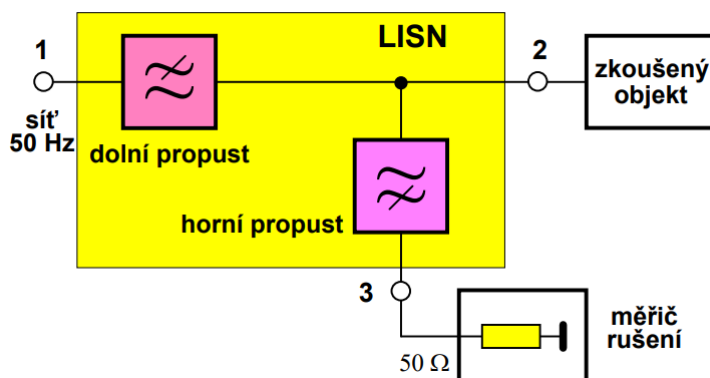
Při měření rušivých signálů se fyzicky prováděnými testy kontroluje jaký stupeň elektromagnetické kompatibility dané elektrické zařízení dosáhlo. Všechna metodika, postupy, okolnosti při testování jsou specifikovány v normách a předpisech. Tato kapitola nejprve představuje základní metody a principy měření rušivých signálů. Další část se věnuje obstaráním správné funkce zařízení při současném působení rušení - odolnosti.

4.1 Měření rušivých signálů (EMI)

Způsob měření a zvolení měřicího přístroje vychází ze způsobů šíření rušivých signálů, které se nachází v kapitole č. 2.3, kde jsou popsány tři způsoby.

4.1.1 S umělou sítí

Umělá síť hlavního vedení (AMN - Artificial mains network), známá taktéž jako umělá zátěž vedení (LISN - Line impedance stabilization network) slouží pro měření rušivých signálů, které jsou produkovány zařízeními napájenými z rozvodné sítě, a které i tímto napájecím vedením zařízení vypouští rušivé signály zpět.



Obrázek 4.1: Blokové schéma umělé sítě LISN [1]

Hlavní funkce umělé sítě LISN:

- Zajistit připojení měřiče rušení k testovanému zařízení pro celý rozsah měřených kmitočtů (funkce horní propusti).
- Na vstupu měřiče rušení se po celou dobu musí objevovat pouze rušivé signály z testovaného zařízení, a nikoliv z vnější napájecí sítě (funkce dolní propusti).
- Přizpůsobení impedance měřiče k výstupním svorkám umělé sítě a ještě zajištění definované hodnoty impedance na výstupních síťových svorkách.

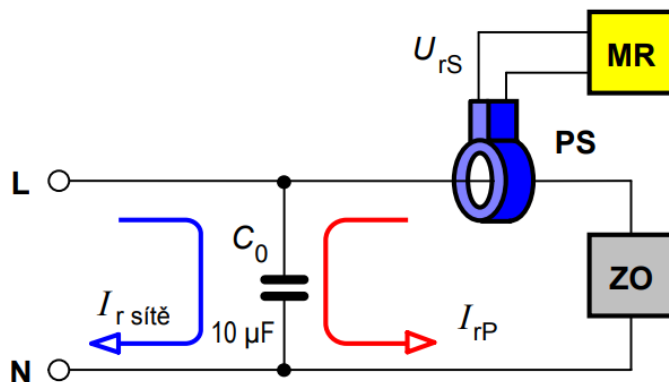
Impedance výstupních síťových svorek simuluje impedanci napájecí sítě v určitém kmitočtovém pásmu. Tato impedance je těžko definovatelná, z toho důvodu je pro různá kmitočtová pásma přesně vymezena v normách (CISPR 16).

4.1.2 Napěťovou sondou

Využívá se k měření rušivého napětí jinde než na napájecích svorkách testovaného zařízení nebo tam, kde není možné měřit umělou sítí LISN. Její největší využití je pro diagnostická měření při vývoji zařízení. Dále se vzhledem k velké vstupní impedanci sondy může využít pro měření obvodů s vysokou impedancí, jenž by byly při měření umělou sítí přetěžovány, kvůli naopak od napěťové sondy nízké impedanci. Sonda je složena z kapacitně vázaného děliče napětí [1].

4.1.3 Proudovou sondou

Je určena k měření rušivého proudu, který protéká daným vodičem. Umožňuje měřit, aniž by se musel jakkoliv přerušovat vodič. Sonda je navržena k nasazení na měřený vodič, který obepíná. Vodič znázorňuje jednozávitové primární vinutí transformátoru. Sekundárním vinutím je pak vlastní proudová sonda - toroid. Toroid se potom skládá ze dvou rozevíratelných částí.

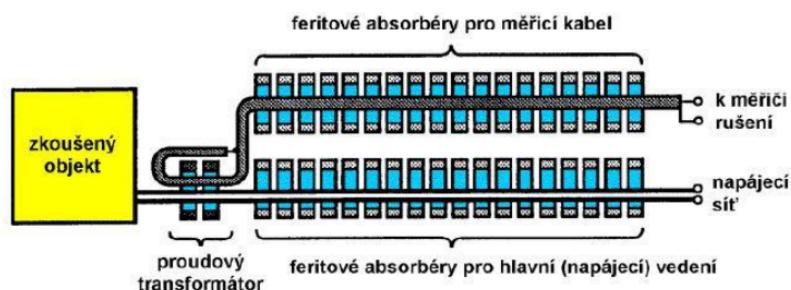


Obrázek 4.2: Schéma měření proudovou sondou (MR - měřič rušení; PS - proudová sonda; ZO - zkoušený objekt) [1]

Když se uzavře toroid kolem měřeného vodiče, tak se rušivý primární proud I_{rP} převádí na výstup sekundárního vinutí (napětí U_{rS}). Kondenzátor C_0 slouží k uzavření vysokofrekvenční cesty rušivého proudu ze zkoušeného objektu a zároveň blokuje rušení z napájecí sítě. [1]

4.1.4 Absorpčními kleštěmi

Určeno pro měření rušivého signálu vyzařovaného napájecím vedením testovaného zařízení v kmitočtovém pásmu od 30 MHz do 1000 MHz. Absorpční kleště (obr. 4.3) se skládají z proudové sondy (proudového transformátoru) a z feritového absorbéru (přizpůsobené zátěže), který je tvořen z velkého počtu feritových kroužků, které jsou rozmístěny okolo proměřovaného kabelu a zároveň okolo měřicího kabelu. Ty, které jsou umístěné okolo měřicího kabelu omezují nežádoucí vysokofrekvenční proud tekoucí po povrchu kabelu do měřiče rušení. Kroužky kolem proměřovaného kabelu mají funkci širokopásmového absorbéru výkonu rušivého signálu, čímž stabilizují vysokofrekvenční impedance kabelu.



Obrázek 4.3: Absorpční kleště [1]

4.1.5 Pomocí antén

Slouží pro měření rušivých signálů (elektromagnetického pole) vyzařovaných jejich zdrojem do okolního prostoru ve frekvenčním pásmu od 10 kHz do několika GHz. K jejich měření slouží měřicí přijímač spolu s vhodně zvolenou měřicí anténou.

Existuje hned několik druhů antén, z nichž každý nachází užití pro jiné frekvenční pásmo. U frekvencí od 10 kHz do 30 MHz se pro měření rušivého magnetického pole využívají rámové antény. K měření rušivého elektrického pole slouží na těchto kmitočtech antény prutové a také dipólové. V pásmu frekvencí od řádů desítek MHz až po jednotky GHz jsou pro měření rušivého elektromagnetického pole určeny od nižších po vyšší frekvence postupně antény bikónické, logaritmicko-periodické a nakonec kónicko-logaritmické. Rušení v nejvyšším kmitočtovém pásmu, tedy od jednotek po desítky GHz, se měří pomocí antén trychtýřových. Každá z antén slouží k měření rušivých signálů v různých frekvenčních pásmech. Vytvořily se i kombinace těchto druhů antén, které dokáží pokrýt více frekvenčních pásem najednou. [1]

4.2 Testování odolnosti (EMS)

Díky skutečnosti, že je v reálném světě nemožné eliminovat všechny zdroje elektromagnetického rušení, je žádoucí správná funkce konkrétního zařízení za současného působení všech zdrojů rušení. Celková EMS se dělí na dvě skupiny - interní a externí. Interní EMS je odolnost proti rušení, které vzniká uvnitř vlastního systému. Externí EMS se zabývá rušením vznikajícím vně.

4.2.1 Funkční kritéria

Jsou založeny na posouzení jakékoliv změny v provozním stavu či ve funkci zkoumaného zařízení. V kmenové normě pro elektromagnetickou odolnost jsou kritéria specifikována a rozdělena takto:

- **Funkční kritérium A** - Zařízení musí během zkoušky pokračovat v činnosti dle určení. Není dovoleno zhoršení činnosti či ztráta funkce zařízení. [1]
- **Funkční kritérium B** - Zařízení musí po skončení zkoušky pokračovat ve své činnosti dle svého určení. Během zkoušky je dovoleno zhoršení činnosti

zařízení, není však povolena změna aktuálního provozního stavu zařízení ani změna dat v paměti. Po skončení zkoušky není dovoleno žádné zhoršení činnosti zařízení ani ztráta jeho funkce. [1]

- **Funkční kritérium C** - Je povolena dočasná ztráta funkce zařízení za předpokladu, že se tato funkce po skončení zkoušky odolnosti obnoví sama nebo může být obnovena činností řídicího systému či zásahem operátora dle specifikace v návodu k použití daného zařízení. [1]

Někdy bývá uvedeno i další kritérium (D), které znamená poškození či úplné zničení zařízení. Dále jsou tu třídy odolnosti, které jsou často rozděleny do několika úrovní (např. A, B, C, D). Ty specifikují míru odolnosti zařízení proti různým formám rušení. Na základě funkčních kritérií a tříd odolnosti se potom po provedené zkoušce odolnosti kvalitativně posuzuje funkčnost zařízení.

V automobilovém průmyslu se pro posouzení odolnosti také využívají vybraná funkční kritéria a třídy odolnosti určené pro konkrétní aplikační skupiny zařízení. Aplikační skupina I zahrnuje nejzásadnější komponenty (systém ABS, vnější osvětlení a další bezpečnostní systémy), které musí fungovat bezchybně při jakémkoliv rušení a musí splňovat nejvyšší třídu odolnosti. Aplikační skupina II, označována jako komfortní, zahrnuje zařízení jako např. klimatizace a navigace, přičemž chyby těchto zařízení neohroží bezpečný provoz vozidla a mohou tedy mít nižší třídu odolnosti.

4.2.2 Zkušební signály

Jsou vytvářeny generátorem (simulátorem) zkušebnímu rušivému signálu. Nacházejí uplatnění u všech zkoušek elektromagnetické odolnosti a požadavkem ne ně je se co nejvíce přiblížit skutečným rušivým signálům, a to jak velikostí, tak průběhem času i kmitočtu. Z časových průběhů a frekvenčního spektra lze všechny zkušební rušivé signály konstruovat ze čtyř průběhů:

- **Úzkopásmové periodické** - tvořeny harmonickým periodickým časovým průběhem funkce sinus.
- **Úzkopásmové neperiodické** - harmonický časový průběh, který se podobá tlumené funkci sinus.
- **Širokopásmové periodické** - mají periodický impulzní průběh.

- **Širokopásmové neperiodické** - obvykle v podobě jednorázového impulzu.

Z výše uvedených čtyř druhů signálů je možné dle potřeb sestrojít jakýkoliv zkušební signál pro testy EMS.

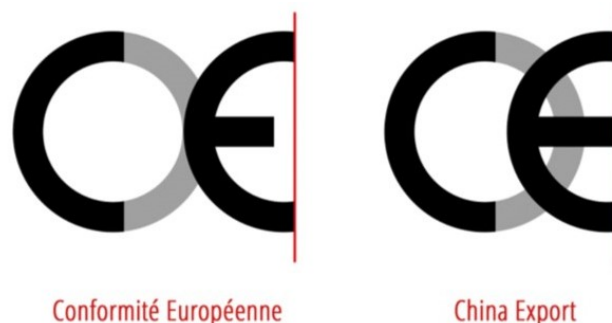
4.2.3 Druhy zkoušek

Ve všeobecném průmyslu lze najít velké množství druhů zkoušek elektromagnetické odolnosti. Zde jsou některé z nich vyjmenovány:

- Zkouška odolnosti vůči rušivým vlivům v energetické síti
- Zkouška odolnosti vůči vysokoenergetickým širokopásmovým impulzům
- Zkouška odolnosti vůči nízkoenergetickým širokopásmovým impulzům
- Zkouška odolnosti vůči tlumeným oscilačním vlnám
- Zkouška odolnosti vůči ESD
- Zkouška odolnosti vůči vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím

4.3 Značka CE

K označení produktů vypouštěných na trh Evropské unie a Evropského hospodářského prostoru, které splňují všechny relevantní požadavky, je vyžadována značka CE. Umísťuje se na samotný produkt nebo jeho štítek či dokumentaci tak, aby byla čitelná a nesmazatelná. Pro její úspěšné získání se provádí proces hodnocení shody, který ověřuje, že produkt splňuje všechny příslušné požadavky a odpovídá směrnici a normám EU, které zaručují, že produkt prošel testy a úspěšně je zvládl. Na trhu existuje ještě jedno logo značky CE, s tím rozdílem, že má písmena umístěna blíže sobě a jedná se o značku China Export, jenž je užívána čínskými a dalšími jinými výrobci a dodavateli. Na obr. 4.4 je znázorněno jejich porovnání.



Obrázek 4.4: Značka CE a její porovnání s China Export [6]

5 Automobilový průmysl

Stěžejní částí bakalářské práce je elektromagnetická kompatibilita v odvětví automobilového průmyslu. S rapidním nárůstem počtu běžných elektrických zařízení a spotřebičů ve světě se zvyšují a zpřísnují nároky na splňování EMC, čemuž není jinak ani u automobilů, u nichž se nově nachází různé pokročilé asistenční systémy nebo inteligentní infotainment systémy. V neposlední řadě jde také o pohony u elektromobilů, jejichž počet na trhu by měl v příštích letech ještě mnohonásobně narůst, jelikož se Evropská unie chystá zakázat v roce 2035 prodej nových benzínových a naftových automobilů s cílem snížit emise uhlíku a skleníkových plynů. V Číně a USA bude nástup elektromobilů pomalejší.

Podle trendů posledních let a vyhlídek do těch budoucích se do vozidel instaluje a bude instalovat větší množství elektrických komponent, než tomu bylo dříve. Tato kapitola se věnuje EMC u automobilů spolu s jejím testováním a normami.

5.1 Úvod

Prudký nárůst počtu elektrických, elektronických součástí a dalších subsystémů instalovaných do dopravních prostředků začal v 70. letech 20. století. Jde jak o elektroniku ve vlastním pohonném, ovládacím a řídicím systému v dopravním prostředku, tak i o vestavěné elektronické komunikační, navigační, bezpečnostní, informační a zábavní technologie. Odhad ceny zahrnující všechny elektrické komponenty u střední třídy automobilu činil v roce 2010 zhruba třetinu celkové ceny automobilu. [7]

Elektronické a elektrické komponenty u dnešních automobilů pracují na frekvencích od 0 Hz po několik desítek GHz s výkonovými úrovněmi od několika

mW po desítky W. Kdyby se vyskládala za sebe do série všechna kabeláž natažená ve dnešních vozidlech, tak by dosáhla délky více než 2,5 km. [7]

Šance vzájemného vyrušení některého elektrického prvku automobilu je velice vysoká a je tak potřebné zajistit jejich elektromagnetickou kompatibilitu a i kompatibilitu vozidla jako celku. Je kladen vysoký důraz této potřeby, jelikož vyrušení některé elektronické části nebo více částí může vést k nesprávnému chodu, tím může vzniknout porucha a v nejhrošším případě i ohrožení či ztráta na lidských životech. Vždy a všude, kde se vozidlo může vyskytnout je potřeba mít zaručenou bezpečnost chodu vozidla. Požadavky na EMC v automobilové technice jsou v některých případech odlišné od požadavků na normální spotřebiče a zařízení. [7]

Při vyhodnocování elektromagnetické kompatibility je třeba brát v potaz jak EMC automobilu jako jednoho celku spolu s pevně zakomponovanými elektronickými systémy, tak zároveň i EMC jednotlivých součástí a komponent (ESA), které jsou vyrobeny pro implementaci do automobilu. Normy se pak týkají buď celých vozidel, nebo samostatných ESA, popřípadě i obou případů. V této práci je ovšem největší důraz kladen na normy pro ESA.

5.2 Legislativa automotive

Pro automobilový průmysl vytváří normy stejné organizace jako pro elektrická a elektronická zařízení, která nejsou určena pro automotive (kap. 3). S tím rozdílem, že u automobilů je stěžejní částí legislativy předpis EHK OSN č. 10 (UNECE R10) vydaný Evropskou hospodářskou komisí Spojených národů. Předpis udává, že všechna vozidla a komponenty, které jsou na trhu členských států EHK OSN musí být v jeho souladu. [8]

Problém nastává při vybírání vhodných norem pro testování EMC v automotive. Pro produkty určené na evropský trh je často vyžadován právě předpis EHK OSN č. 10, který stanovuje komplexní rámec pro testování EMC automobilů i jejich komponent. Musí se vzít v potaz, že různé typy zařízení mohou vyžadovat odlišné přístupy k testování. Například celé vozidlo může být testováno podle EHK OSN č. 10, ale komponenty (ESA) mohou vyžadovat dodržení specifitějších norem (např. CISPR 25), které poskytují detailnější popis určitých druhů testů.

5.2.1 Předpis EHK OSN č. 10

Tento mezinárodní dokument [9] je v souladu s mnoha mezinárodními normami a je harmonizován s příslušnými požadavky EU. Sám se potom odkazuje na některé z mezinárodních norem EMC (tab. 5.1), ve kterých jsou definovány limity, testovací sestavy či celé metodiky. Předpis shromažďuje požadavky pro elektromagnetickou kompatibilitu vozidel a jejich komponent. Kromě osobních vozidel (kategorie M) se vztahuje i na kategorie L, N, O, T, R a S. Celkový počet zemí, které uplatňují tento dokument činí více než 60.

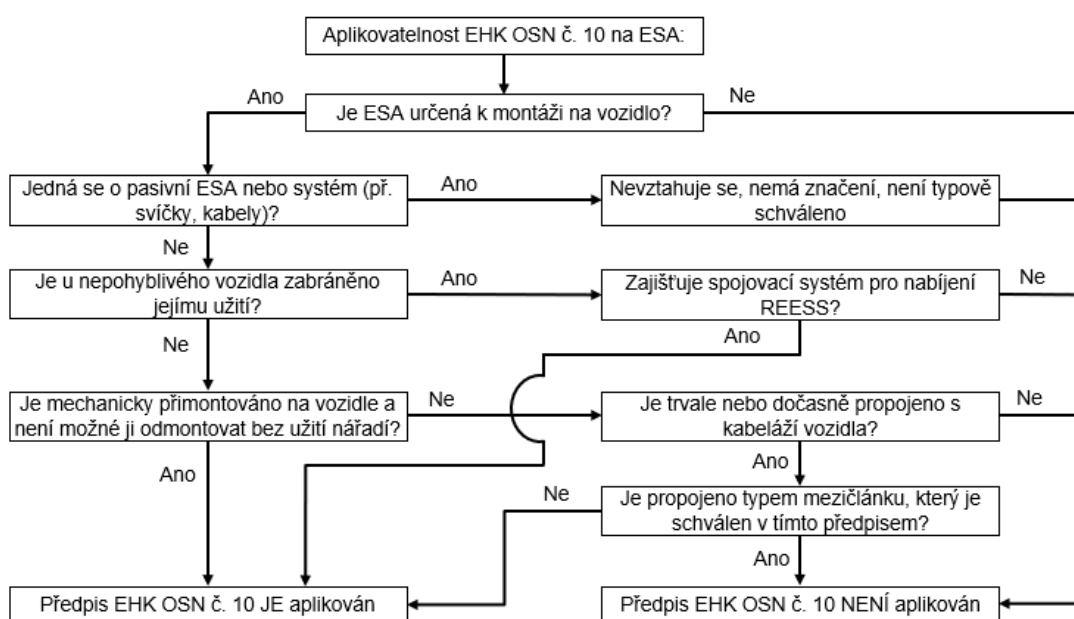
| Označení normy | Definice normy |
|----------------|---|
| ISO 11451 | Silniční vozidla – Zkušební metody vozidel pro elektrické rušení úzkopásmovou vyzařovanou elektromagnetickou energií |
| ISO 11452 | Silniční vozidla - Metody zkoušení součástí pro elektrické rušení úzkopásmovou vyzařovanou elektromagnetickou energií |
| CISPR 16-1-4 | Specifikace pro měřicí přístroje a metody rádiového rušení a imunity - Část 1: Přístroje pro měření rádiového rušení a imunity - Antény a zkušební místa pro měření vyzařovaného rušení |
| CISPR 25 | Vozidla, lodě a spalovací motory - Limity a metody měření pro ochranu přijímačů ve vozidle |
| IEC 61000-4-4 | Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-4 - Zkušební a měřicí technika - Elektrický rychlý přechodný jev/skupina impulzů – Zkouška odolnosti |
| IEC 61000-4-5 | Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-5 - Zkušební a měřicí technika - Rázový impulz – Zkouška odolnosti |

Tabulka 5.1: Příklady norem, na které se předpis EHK OSN č. 10 odkazuje [8]

Obsah předpisu

- Předpis určuje požadavky na odolnost (EMS) vůči rušením šířícím se vyzařováním a vedením, které jsou klíčové pro přímé ovládání vozidla. Zahrnují bezpečnost řidiče, spolujezdce a ostatních účastníků provozu před poruchami, které by mohly způsobit jejich zmatení. Požadavky rovněž zahrnují zajištění správné funkce datové sběrnice a ochranu před poruchami, které by mohly ovlivnit zákonem stanovené údaje o vozidle.

- Dále stanovuje požadavky směřované na kontrolu nežádoucích vyzařovaných a vedených emisí (EMI), které zajišťují ochranu před rušením v normálním provozu elektrických nebo elektronických zařízení ve vozidle nebo okolních vozidlech v blízkosti. Zahrnuje i kontrolu rušení z komponent, které se mohou do vozidla namontovat až dodatečně.
- V předpise lze taktéž nalézt pravidla vztahené na systémy pro nabíjení elektrických vozidel, včetně odolnosti a emisí spojených s nabíjecími systémy spolu s vozidlem a elektrickou sítí.



Obrázek 5.1: Diagram aplikovatelnosti předpisu na ESA [9]

Významné pojmy užívané v EHK OSN č. 10

- **REESS (Rechargeable energy storage system)** - dodává elektrickou energii pro elektrický pohon vozidla. Dvě hlavní komponenty REESS v automobilu jsou battery management system (BMS) a samotná baterie.
- **Skupina ESA A** - ESA, která jsou součástí REESS. Týká se elektromobilů a hybridních elektrických vozidel. Jedná se o zařízení a komponenty, které jsou aktivní po dobu nabíjení REESS (např. kabely, nabíjecí infrastruktura vozidla).

- **Skupina ESA B** - sem patří zařízení a komponenty mimo REESS. Komponenty používané při běžném provozu vozidla (např. audio systémy, navigace).
- **Širokopásmové vyzařování** - vyzařování, jehož šířka pásma je větší než šířka pásma jednotlivého měřicího zařízení či přijímače (CISPR 25).
- **Úzkopásmové vyzařování** - vyzařování, které má šířku pásma menší, než je šířka pásma jednotlivého měřicího zařízení nebo přijímače (CISPR 25).

5.2.2 Norma ISO 10605

Norma je mezinárodní standard [10], který se zabývá testováním ESD pro elektronická zařízení používané v automobilovém průmyslu. Cílem této normy je stanovit metodiku pro zkoušky a hodnocení odolnosti automobilových elektronických komponent a systémů vůči ESD.

Elektrostatický výboj

Za vznik elektrostatického výboje mohou rozdílné elektrické potenciály dvou těles, mezi kterými se rychle uvolní statický elektrický náboj. Elektrostatické výboje se nejčastěji vyskytují, když dojde k přímému kontaktu zařízení s člověkem nebo jiným objektem, který na svém povrchu nese naakumulovaný elektrostatický náboj. Dalším typem výboje je výboj přes vzduch, kdy elektrostatický náboj přeskóčí mezi dvěma objekty formou viditelné jiskry. Tento jev se vyskytuje, když elektrické pole mezi objekty dosáhne dostatečné intenzity na to, aby překonalo dielektrickou pevnost vzduchu. Navíc mohou výboje nastat i bez fyzického kontaktu či přenosu vzduchem. Pokud se osoby nebo předměty nacházejí v blízkosti zařízení, může dojít k vytvoření povrchového náboje na zařízení prostřednictvím elektromagnetické indukce, což může vést k elektrostatickému výboji.

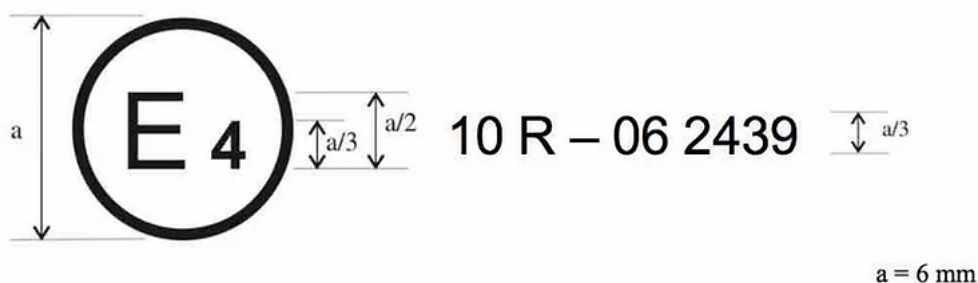
Pro elektronická zařízení mohou být výboje velice škodlivé. S postupnou miniaturizací elektronických součástek užívaných v zařízeních se citlivost součástek (např. integrovaných obvodů) na ESD zvyšuje. I když energie výboje bývá okolo 10 mJ, což je extrémně nízká hodnota, tak stačí k poškození či zhoršení funkce zařízení, a to zejména díky vysoké hodnotě napětí elektrostatického impulsu, která může být i přes 15 kV a také díky rozsáhlé šířce rušivého kmitočtového spektra (až 1 GHz). [1][11]

5.2.3 Norma CISPR 25

Jedná se o mezinárodní standard [12], který je zaměřený na EMI a EMS radiového rušení šířeného elektronickými zařízeními ve vozidlech prostřednictvím vedení a vyzařování. V normě jsou specifikovány testovací prostředí a metody pro vyzařované i vedené rušení, včetně mezí a limitů přijatelných úrovní těchto rušení.

5.3 E - značka

U automobilů se dle EHK OSN č. 10 pro označení schválených komponent a zařízení namísto CE značky užívá E - značka, která se umísťuje přímo na automobil nebo na ESA. Musí jí disponovat všechna úspěšně certifikovaná vozidla i ESA, která jsou určena pro trh Evropské unie. Je požadováno, aby byla umístěna na hlavní části ESA, aby byla jasně čitelná a v žádném případě nešla smazat. Nečitelná může být v případě, že je ESA již pevně integrováno ve vozidle. Bez značky mohou být elektrické a elektronické systémy zabudované ve vozidle s uděleným schválením typu dle předpisu EHK OSN č. 10. Značkou nemusí disponovat ani náhradní díly s identifikačním číslem, jež jsou totožné a pocházející od stejného výrobce jako originální díl, který je již typově schválen.



Obrázek 5.2: E-značka [9]

Značka se používá pro schválení typu vozidla nebo elektronické komponenty do vozidla. Číslo za písmenem E se používá pro kódové značení země Evropské unie, ve které bylo vydáno dané schválení typu. V případě tohoto obrázku: 4 - Nizozemsko. Schválení v České republice by byla opatřena číslem 8. [7][9]

Následuje číslo 10, což udává číslo předpisu. Za pomlčkou se pak nachází šesti-místné číslo, První dvě čísla označují pořadové číslo přidělené poslední významnější technické novelizaci výchozí směrnice. Toto dvojčíslí značí, že schválení odpovídá šesté změně této směrnice. Ostatní číslice vyznačují základní registrační číslo schvá-leného produktu přidělené příslušným schvalovacím orgánem. [7][9]

5.4 Testování a měření EMC v automobilovém sektoru

Některé z testů elektromagnetické kompatibility u automobilů vychází z norem a tes-tů pro obecná elektrická zařízení a systémy. A jiné se zase řídí jinými normami s odlišnými požadavky. Zde jsou základní druhy testů popsány a spolu s nimi i sou-vislosti s testy obecných zařízení. Převažující většina testů popsaných níže pochází především z předpisu EHK OSN č. 10.

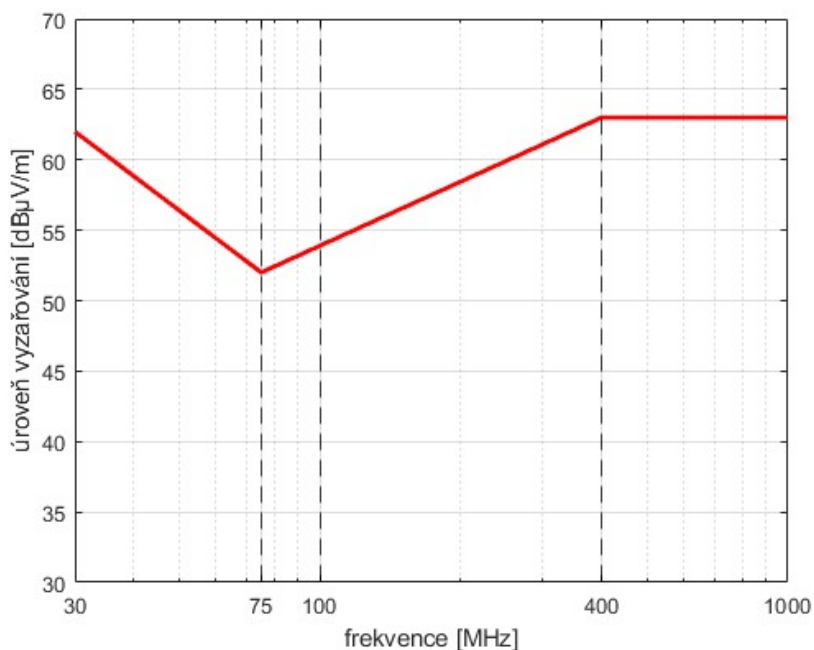
5.4.1 Měření širokopásmového elektromagnetického rušivého vyzařování ESA

Jelikož emise šířené vedením přispívají k emisím šířeným vyzařováním (vyzařování vodičů), tak nejdříve musí dosáhnout shody s požadavky na emise šířené vedením a až potom je možné provést měření vyzářených emisí ESA (např. elektromotor, zapalovací systémy). Zkouška se dle předpisu EHK OSN č. 10 [9] provádí v souladu s CISPR 25 [12]. U ESA s REESS (ESA skupiny A z kap. 5.2.1), platí, že může být zkouška provedena buď v absorpční stíněné komoře (ALSE), aby bylo dosaženo izolace od vysokých úrovní rušení z vnějších elektrických zařízení a televizních či rozhlasových vysílačů. Metoda ALSE je charakterizována v CISPR 25. Alternativ-ním místem vykonání zkoušky je otevřený prostor (OATS), jehož specifikace jsou v CISPR 16-1-4 [13]. Pro ESA skupiny B z kap. 5.2.1 platí, že se zkouška musí provést v ALSE.

Nejprve je tedy testován na vyzářené emise kabelový svazek a následně až samotné ESA. Délka kabelového svazku mezi DUT a simulátorem zatížení nesmí překročit 2000 mm. Svazek je umístěn na nevodivém materiálu, který leží na zemní referenční rovině. Simulátor zatížení je položen přímo na zemní rovině.

Měření záření produkovaného samotnou ESA probíhá v jejím provozním stavu. Pokud se zkouška provádí s ESA skupiny A, tak ESA musí být v režimu nabíjení. V případě, že se zkouška provádí s ESA skupiny B, tak je testované zařízení zkoušeno při jmenovitém proudu. Zkoušené zařízení se umísťuje na nevodivý materiál o tloušťce 50 mm, který je na referenční zemní rovině. Výška fázového středu měřicí antény musí být 100 mm nad referenční zemní rovinou. Mezi referenčním bodem antény a zkoušeným ESA je vzdálenost 1000 mm.

Při měření jsou využívány umělé sítě. U ESA s vysokonapětovým napájením DC musí být napájení spojeno přes $5 \mu\text{H}/50 \Omega$ vysokonapětovou umělou síť (AN). U ESA s AC napájením musí napájení být spojeno přes $50 \mu\text{H}/50 \Omega$ umělou síť hlavního vedení (AMN). Síť a všechny náležitosti jsou popsány v EHK OSN č. 10. ESA musí být přímo nebo přes impedanci spojeno se zemní deskou. Měření se provádí kvazi-špičkovými nebo špičkovými detektory a probíhá v pásmu od 30 MHz do 1 GHz. Dále je využit spektrální analyzátor nebo skenovací přijímač.



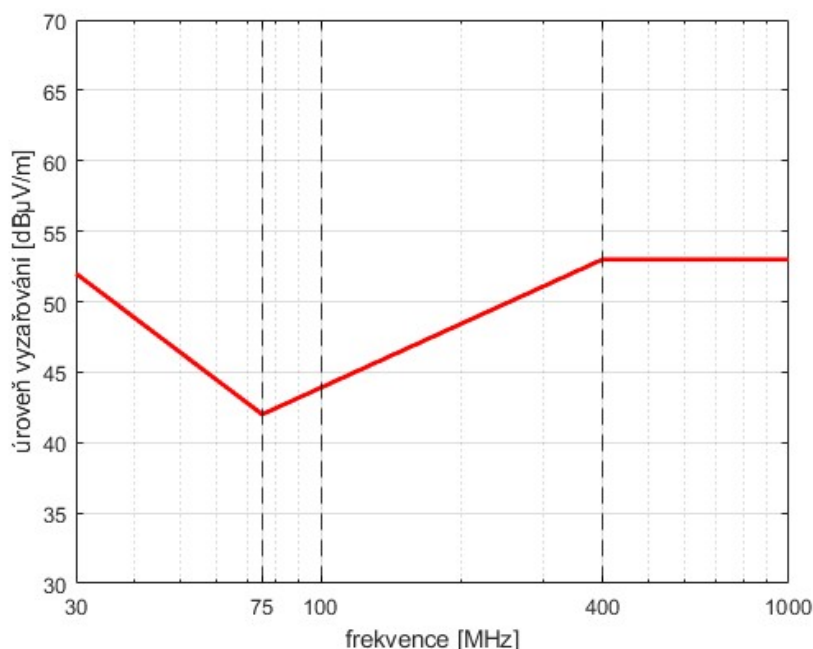
Obrázek 5.3: Maximální meze širokopásmového rušivého vyzařování

5.4.2 Měření úzkopásmového rušení vyzařovaného prostřednictvím ESA

Provádí se pouze u ESA skupiny B (viz kap. 5.2.1). Cílem zkoušky je změřit úzkopásmové elektromagnetické vyzařování, které je produkováno především mikroprocesorovým systémem. Zkouška se provádí metodou ALSE v souladu s CISPR 25 [12]. Je požadováno, aby zkoušené zařízení bylo během zkoušek v běžném provozním stavu.

Měření lze alternativně provést i v OATS (dle CISPR 16-1-4), kde se měří stejně tak jako u metody ALSE v kmitočtovém pásmu od 30 MHz do 1 GHz. Měření se provádí s detektorem střední hodnoty spolu se spektrálním analyzátozem nebo skenovacím přijímačem, jejichž parametry jsou uvedeny přímo v předpise EHK OSN č. 10.

K měření se využívá proudová sonda, jejíž specifikace jsou v CISPR 16-1-2 [14]. Sonda se montuje kolem celého svazku. Pokud je více kabelových svazků, tak se měření provádí jednotlivě pro všechny svazky. Samotná sonda je ve vzdálenosti 750 mm od zkoušeného zařízení (DUT).



Obrázek 5.4: Maximální meze úzkopásmového rušivého vyzařování

DUT je položeno na nevodivém materiálu na referenční zemní rovině. Strany DUT jsou alespoň 100 mm od kraje referenční zemní roviny a alespoň 500 mm od stěny ALSE komory. Testovací svazek kabelů mezi DUT a simulátorem zatížení se umísťuje na nevodivý materiál na zemní referenční rovinu.

5.4.3 Testování odolnosti ESA vůči elektromagnetickému záření

Zde jsou nároky jak na ESA, tak celé automobily vyšší než u stejných testů pro zařízení obecného průmyslu. Norma podle které se postupuje při testování ESA je ISO 11452. Metody zkoušení jsou platné pro obě skupiny ESA (kap. 5.2.1). Pro testování celých vozidel je výchozí normou ISO 11451.

Zkouška v absorpční komoře

Jedná se o zkoušku, kdy se ESA vystaví elektromagnetickému vysokofrekvenčnímu (RF) záření vytvářenému anténami. Provádí se dle normy ISO 11452-2 [15]. Měření probíhá ve frekvenčním rozsahu od 80 MHz do 18 GHz. Testovací sestava je složena ze zemní plochy, generátoru pole (anténa), sondy pro měření pole, umělé sítě, RF generátoru, vysoce výkonného zesilovače a měřiče výkonu.

Napájecí kabely DUT musí být přivedeny přes $5 \mu\text{H}/50 \Omega$ AN, měřicí port AN musí být zakončen 50Ω zátěží. Napájecí vedení mezi zdrojem a simulátorem zátěže se umísťuje přímo na zemní plochu. Samotné DUT leží na izolačním bloku, který je umístěn na zemní ploše. Délka zkušebního svazku kabelů mezi DUT a simulátorem zátěže musí být 1700 mm - 2000 mm a musí být umístěn na nevodivém materiálu, tak jako DUT. Simulátor zátěže se pokládá přímo na zemní plochu. Výška fázového středu antény musí být 100 mm nad zemní plochou. Vyzařovací prvky antény nesmí být blíže než 0,5 m od stěny v podobě absorpčního materiálu. Vzdálenost mezi anténou a kabelovým svazkem musí být 1 m.

Zkouška v TEM komoře

Provádí se dle normy ISO 11452-3 [16]. Pro testy automobilových elektronických systémů by měla být použita TEM komora 0,01 MHz až 200 MHz. Komora TEM použitá pro tento test je obdélníkové koaxiální vedení s impedancí 50Ω . DUT je v komoře vystaveno rovnoměrnému TEM poli. Předpis EHK OSN č. 10 pak určuje typické rozměry komory.

Zkouška proudovou injektáží (BCI)

Odolnost je testována pomocí BCI, která indukuje proud přímo do kabelového svazku. Zkouška je prováděna dle ISO 11452-4. Testování probíhá v kmitočtovém pásmu od 1 MHz do 400 MHz.

Zkouška páskovým vedením

Tato metoda testuje kabelový svazek ESA jeho vystavením elektromagnetickému poli. Provádí se dle ISO 11452-5. Zkouška probíhá ve frekvenčním pásmu od 10 kHz do 400 MHz. K provedení zkoušky je tak jako např. u ISO 10605 potřeba specifický přípravek.

5.4.4 Měření rušení harmonických generovaných AC napájecími vodiči z ESA

Provádí se pouze u ESA skupiny B (viz kap. 5.2.1). Jak uvádí Předpis EHK OSN č. 10 zkouška se vykoná v souladu s normami obecného průmyslu. Jedná se o normy ČSN EN 61000-3-2 a ČSN EN 61000-3-12, ve kterých jsou specifikovány zkušební metody pro testování jak jednofázových, tak třífázových ESA s různými vstupními proudy. Měření sudých a lichých harmonických probíhá až do čtyřicáté harmonické. Dovolené meze rušení jsou popsány v EHK OSN č. 10.

5.4.5 Měření vyzařování změn napětí, výpadků napětí a flikru na AC napájecích vodičích z ESA

Týká se pouze ESA skupiny B (kap. 5.2.1). V předpise EHK OSN č. 10 je uvedeno, že se zkouška provádí dle obecných norem ČSN EN 61000-3-3 a ČSN EN 61000-3-11, to podle velikosti jmenovitého proudu testovaného zařízení. V normách jsou pak definovány i dovolené meze pro schválení typu ESA.

5.4.6 Měření vyzařování vysokofrekvenčního vedeného rušení na AC nebo DC napájecích vodičích z ESA

Zkouška má zajistit kompatibilitu zařízení s obytným a obchodním prostředím a prostředím lehkého průmyslu. Provádí se podle CISPR 16-2-1 [17]. Měření se vykonává ve stíněném zařízení, ALSE nebo OATS, a to v kmitočtovém rozsahu

od 150 kHz do 30 MHz. Měření je provedeno se spektrálním analyzátozem nebo skenovacím přijímačem a dále s detektorem střední hodnoty spolu s detektorem kvazi-špičkové hodnoty nebo špičkové hodnoty. Jejich požadované parametry a meze, které se mění v rozmezí kmitočtů od 150 kHz do 30 MHz, popisuje předpis EHK OSN č. 10 [9].

Při testování napájecího vedení jsou využívány umělé sítě (AN), které se přidělávají přímo k zemní desce. Vyzařování z napájecích vedení jsou postupně měřeny na každém jednotlivém vodiči, který je připojen na vstup měřicího přijímače na umělé síti. Měřicí svorky AN musí mít na konci zátěž 50 Ω .

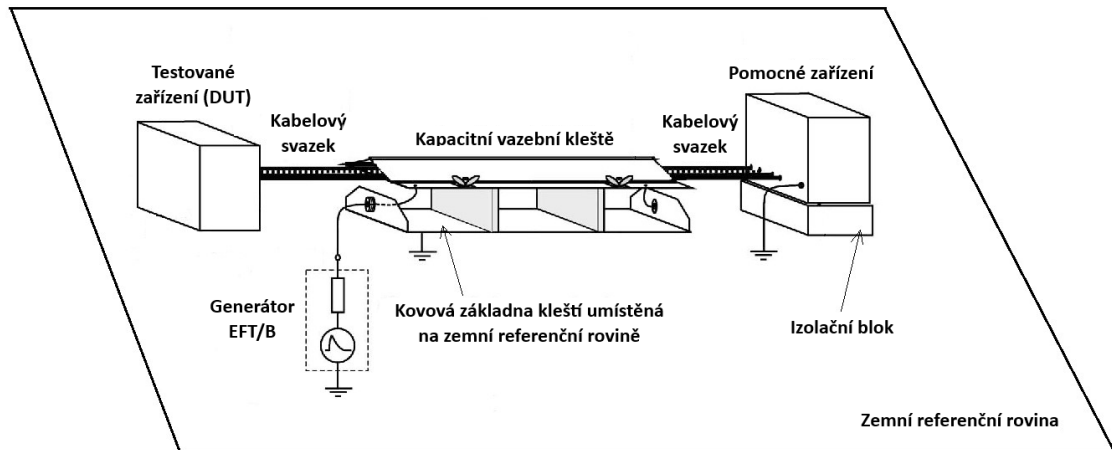
5.4.7 Měření vyzařování vysokofrekvenčního rušení šířeného vedením generovaného ESA na síti a telekomunikačním přístupu

Toto měření probíhá z důvodu zajištění kompatibility s obytným, obchodním prostředím a prostředím lehkého průmyslu. Je provedeno dle normy CISPR 22, jak uvádí EHK OSN č. 10. Pro testování se využívá prostorů stíněného zařízení, ALSE nebo OATS, ve kterých se měří na kmitočtech od 150 kHz do 30 MHz. Zkušební sestava je mimo jiné složena z asymetrické umělé sítě (AAN - Asymmetric artificial network), spektrálního analyzátozu a detektoru střední hodnoty spolu s kvazi-špičkovým detektorem nebo špičkovým detektorem. Parametry měřičů a požadavky zkoušky jsou dány uvedenou normou a předpisem.

5.4.8 Testování odolnosti vozidel a ESA vůči rychlým elektrickým přechodným jevům nebo skupinám impulzů v AC a DC napájecích vodičích

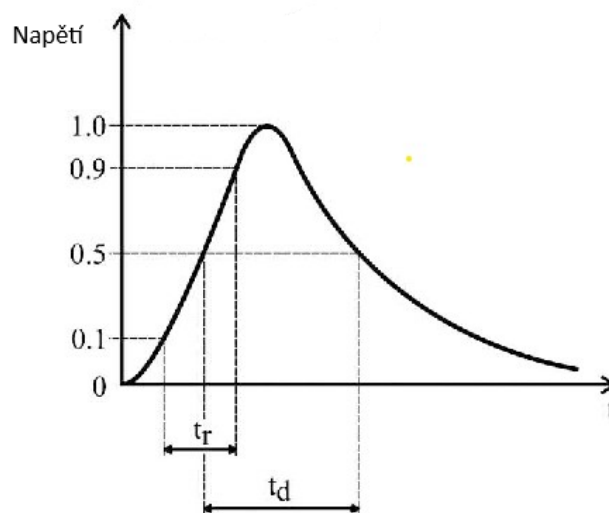
Tento test obstarává schopnost komponent ve vozidle správně pracovat a odolávat rušení v elektrickém prostředí při běžném chodu vozidla. Testovaná vozidla a ESA by se měla monitorovat, kvůli kontrole splnění požadavků, přičemž pro monitorování se musí použít zařízení, která neprodukují rušení. Zkoušky jak celých vozidel, tak ESA jsou dle EHK OSN č. 10 [9] prováděny podle normy ČSN EN 61000-4-4 [18].

Při testování ESA podle standardů pro automobily tvoří zkušební výbavu stejné komponenty jako při testování elektrických/elektronických zařízení podle všeobecných průmyslových standardů. Zkušební výbavu lze vidět na obrázku 5.5.



Obrázek 5.5: Zkušební sestava pro zkoušku odolnosti vůči EFT/B [19]

Všechny prvky výbavy musí splňovat podmínky z ČSN EN 61000-4-4. Zkušební sestava pro ESA je, až na jeden malý rozdíl v umístění ESA při zkoušce, totožná se zkušební sestavou uvedenou v ČSN EN 61000-4-4. Testované ESA pod sebou nemá izolační podpěru, ale leží přímo na zemní referenční rovině. EFT/B se aplikují na ESA do AC/DC napájecích vodičů ve společných módech pomocí vazební/oddělovací sítě (CDN).



Obrázek 5.6: Jeden normalizovaný přechodný impuls [19]

Impulzy využívané při testování jsou odvozeny od reálných průběhů vznikajících v napájecí kabeláži automobilu. Pro AC a DC napájecí vedení je zkušební napětí ± 2 kV při otevřeném obvodu s dobou náběhu (t_r) 5 ns a dobou trvání (t_d) 50 ns. Opakovací kmitočet je 5 kHz po dobu minimálně 1 minuty. Pokud nedojde ke zhoršení funkcí souvisejících s odolností, uvedených v EHK OSN č. 10, tak se testované ESA bere jako vyhovující požadavkům na odolnost. [9]

5.4.9 Testování odolnosti vozidel a ESA vůči rázovým vlnám v AC a DC napájecích vodičích

Metoda se týká vozidel a ESA skupiny A i skupiny B (viz kap. 5.2.1), přičemž skupina B se testuje při jmenovitém proudu. Testovaný objekt je během zkoušení monitorován vybavením, které nezpůsobuje rušení. Jak celá vozidla, tak ESA se zkouší podle normy ČSN EN 61000-4-5 [20]. Zkušební výbavu pro testování ESA tato zařízení:

- Referenční zemní rovina
- Generátor rázových vln
- Vazební/oddělovací umělá síť (CDN)

S tím, že generátor rázových vln a vazební/oddělovací síť musí být v souladu s podmínkami uvedenými v normě ČSN EN 61000-4-5, to stejné platí i pro zkušební sestavu ESA, která vychází z laboratorní zkušební sestavy uvedené ve stejné normě. ESA musí být umístěna přímo na referenční zemní rovině. Při zkoušce se rázové vlny posílají do AC/DC napájecích vodičů ESA, a to mezi každý vodič a zem a mezi jednotlivé vodiče pomocí CDN.

Zkušební úrovně jsou pro AC a DC napájecí vedení odlišné. U AC je zkušební napětí ± 2 kV při otevřeném obvodu mezi napájecím vedením a zemí. Mezi napájecími vodiči pak ± 1 kV (pulz 1,2 μ s/ 50 μ s). Doba náběhu (T_r) je 1,2 μ s a doba trvání (T_h) pak 50 μ s. Všechny rázy jsou aplikovány pětkrát a je mezi nimi jednodominutová prodleva. To platí pro fáze 0° , 90° , 180° a 270° . Pro DC je zkušební napětí $\pm 0,5$ kV při otevřeném obvodu mezi napájecím vedením a zemí. Mezi napájecími vodiči je zkušební napětí také $\pm 0,5$ kV (pulz 1,2 μ s/ 50 μ s), přičemž doba náběhu (T_r) a doba trvání (T_h) je stejná jako u AC napájecích vodičů a počet aplikovaných rázů a jednodominutová prodleva je taktéž stejná. [9]

5.4.10 Testování odolnosti zařízení vůči ESD

Celé vozidlo spolu se zakomponovanými systémy je odizolováno od země. Oproti obvykle užívanému "lidskému" modelu užívanému při běžných testech ESD u elektrických zařízení se tedy u automobilů vytvořily jiné modely pro simulaci vybíjení ESD. To z toho důvodu, že zde proces vybíjení není z nabitého kapacitoru (člověk) do země, nýbrž z nabitého kapacitoru (člověk) do dalšího kapacitoru (automobil, komponenty). Norma ČSN EN 61000-4-2 [21] užívaná u běžné elektroniky je v automobilovém průmyslu nahrazena normou ISO 10605 [10]. ISO 10605 popisuje dva modely ESD, ze kterých se odvíjí způsob zapojení ESD simulátoru. První simuluje výboj ze člověka, který je uvnitř vozidla a druhý simuluje výboj člověka, který je vně vozidla a přibližuje s k němu.

Při testech celých vozidel se využívá pouze vzduchového výboje. ESA se testují jak kontaktním výbojem, tak vzduchovým výbojem. Testy v automobilovém sektoru mají testovací úroveň vybíjecího napětí impulzů ESD podstatně vyšší než testy v obecném průmyslu. Tyto úrovně se nastavují od 2 kV do 15 kV u kontaktního výboje a od 2 kV do 25 kV u výboje vzduchem. Úroveň platí pro obě polarity, přičemž minimálním počtem aplikovaných výbojů do každého místa pro obě polarity je 10. Přestávky mezi jednotlivými výboji musí být minimálně 2 sekundy.

Simulátor ESD

Testování odolnosti vůči ESD se provádí testovacím zařízením, a sice simulátorem ESD (nazývaným také jako ESD pistole), jehož tvar, funkce a způsob manipulace připomíná ruční pistoli. Simulátory ESD disponují dvěma vybíjecími hroty - ostrým pro kontaktní výboje a zakulaceným pro výboje vzduchem. Při testování musí být simulátory vodivě spojeny se zemí.

5.5 Rozdílnosti v certifikaci mezi zařízeními pro obecný průmysl a zařízeními pro automobilový průmysl

Mezi certifikacemi pro obě skupiny výrobků se nachází jak z pohledu technických postupů, deklaráce a legislativy značné rozdíly. Zde jsou největší odlišnosti pro evropský trh popsány.

Certifikace produktu pro obecný průmysl nejčastěji probíhá formou vlastního posouzení výrobcem. Další možností je požádání kompetentního orgánu o provedení certifikace. Na druhé straně, výrobci vozidel nebo ESA, pokud si sami provádí testy EMC, tak je musí předat technické službě schvalovacího orgánu, který je přezkoumá nebo požadované testy sám provede. V našem státě je schvalovací orgán Ministerstvo dopravy ČR, jehož technickými službami jsou Elektrotechnický zkušební ústav (EZÚ) a TÜV SÜD Auto CZ s.r.o.

Jako důkaz o úspěšně proběhlé certifikaci výrobku pro obecný průmysl se opatří jejich výrobcem značkou CE (kap. 4.3), která deklaruje jeho shodu s příslušnou směrnicí a normou EU. Vozidla a ESA se označují e-značkou (kap. 5.3), jakožto potvrzení EU pro tzv. schválení typu. Označení e-značkou znamená zároveň i to, že příslušný díl vozu nebo celé vozidlo prošlo schvalovacím orgánem, kterým bylo schváleno.

6 Praktická část

V praktické části se práce zaměřuje na realizaci zkoušek EMC, které odpovídají normám pro automobilový průmysl. Na základě porovnání norem všeobecného a automobilového průmyslu bylo v laboratoři EMC TUL provedeno několik testů s využitím dostupných prostředků

V praktické části byl nejprve vytvořen přípravek pro testování odolnosti zařízení vůči elektrostatickému výboji dle odpovídající normy pro automobilový průmysl. Na tomto přípravku byl následně i tento druh testu proveden. V další části byly realizovány další dvě zkoušky: zkouška odolnosti vůči rychlým elektrickým přechodným jevům a skupinám impulzů (EFT/B) a zkouška rušivého vyzařování z testovaného zařízení. Pro účely testování byla využita část BMS, konkrétně slave jednotka pro monitoring článků baterie, vyvinutá na FM TUL. Během zkoušek odolnosti bylo testované zařízení připojeno USB kabelem k notebooku a jeho funkce (monitorování článků) byla sledována pomocí softwaru BQAutoEval 1.0.4 od firmy Texas Instruments. Napájení BMS jednotky bylo zajištěno z externí baterie, jejíž články jsou zároveň touto jednotkou BMS monitorovány.

6.1 Přípravek pro testování zařízení na odolnost vůči ESD

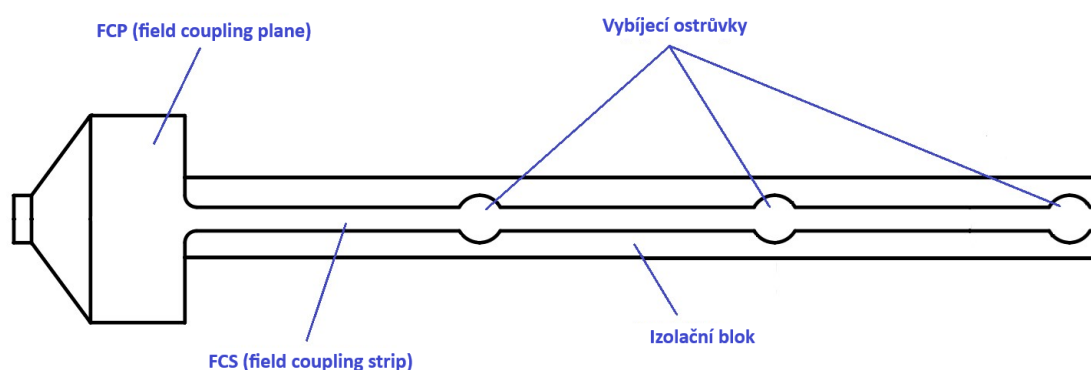
Vytvářený přípravek slouží k testování ESD pro automobilový průmysl. Přesněji pro komponenty ve vozidle. Je navrhován podle přílohy F normy ISO 10605 [10].

Nejprve byl nakreslen CAD model mosazné součásti přípravku pomocí softwaru od společnosti Autodesk. Model společně s potřebnými daty byl následně předán společnosti Kovospol a.s., se žádostí o jeho vyhotovení. Výkres této součásti je k dispozici v příloze A této práce.

Další součástí přípravku je izolační blok, který je vyroben z nevodivého materiálu, jehož relativní permitivita dle normy odpovídá hodnotě nižší než 2,5. V našem případě se jedná o polystyren. Tvar izolačního bloku byl potom vyříznut řezačkou polystyrenu, dostupnou na FUA TUL.

6.1.1 Funkce přípravku

Testované zařízení (DUT) se pokládá na field coupling plane (FCP) tak, aby bylo na každé straně minimálně o 100 mm od okraje FCP. Lze na něm provádět testování jak na přímý elektrostatický výboj, kdy je simulátorem výboj poslán přímo do DUT (konektory, vodivé plochy, šrouby) nebo nepřímý výboj, kdy je výboj poslán do FCP. Na přípravku lze také testovat vliv výboje, který je poslán do kabeláže DUT. Svazek kabelů je natažen přes field coupling strip (FCS) a výboj je v tomto případě poslán přes vybíjecí ostrůvky do kabelů testovaného zařízení. Výboj může být aplikován buď kontaktně (dotykem) nebo bezkontaktně, kdy je výboj přenášen vzduchem.



Obrázek 6.1: Popis hlavních součástí přípravku

6.2 Vlastní měření

Při vlastním měření byly provedeny celkem tři testy, přičemž dvakrát byla testována susceptibilita a jedenkrát interference. V tabulce 6.1 lze vidět, které přístroje se během měření využívaly. Všechna měření probíhala v obdobných klimatických podmínkách laboratoře, při teplotě okolo 22,5 °C a vlhkosti 43 %.

| Výrobce | Přístroj | Typ | Výrobní číslo |
|---------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| EMTEST | generátor EFT/B | Compact NX 5 | P1611176997 |
| EMTEST | kapacitní lišta | Cap. Coupling Clamp | P1827221596 |
| Ametek | bezodrazová komora | GTEM 500 | 57197 |
| Ametek | sonda | PM 6003 | 77999 |
| Ametek | sonda | PM 6003 | 78000 |
| Ametek | směrová odbočnice | DCP 0100 | 56472 |
| Ametek | směrová odbočnice | BDC 5760-40/500 | 1926125-03 |
| Ametek | vf přepínač | RFB 6000 | 57132 |
| Rohde&Schwarz | EMI přijímač | ESRP 7 | 1316.4500K07-101416-mF |
| EMTEST | generátor ESD | dito Set | P1607172395 |
| Rohde&Schwarz | Software | Elektra 10.1 | |

Tabulka 6.1: Soupis přístrojů

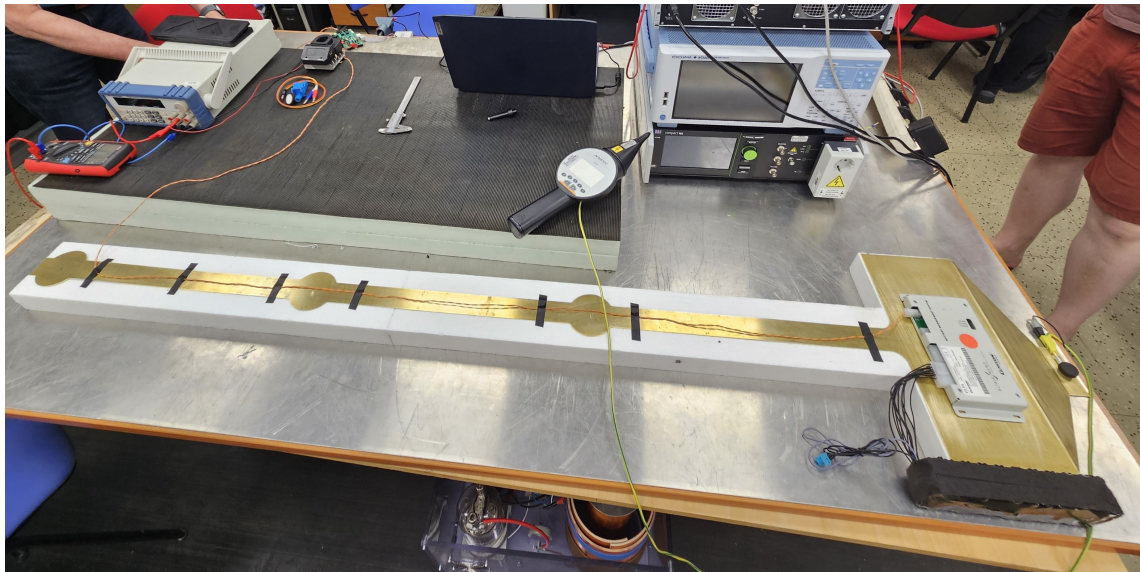
6.2.1 Zkouška odolnosti BMS jednotky vůči ESD

Zkouška byla vykonána na výše popisovaném vytvořeném přípravku (viz kapitola 6.1). Měření bylo provedeno dle odpovídající normy ISO 10605 [10]. BMS jednotka byla umístěna na FCP uvedeného přípravku. Baterie byla umístěna u BMS vedle testovacího přípravku, přímo na zemní ploše. Přes FCS bylo nataženo komunikační datové vedení. Ke generování samotných výbojů byl použit simulátor ESD, který je k dispozici v laboratoři EMC (obr. 6.2). Simulátor je od firmy EMTEST (tab. 6.1) a dokáže generovat výboje s testovacím napětím až 16,5 kV.



Obrázek 6.2: Generátor ESD od EMTEST s ostrým hrotem pro kontaktní výboj

Při testování kontaktním výbojem (hrot CD) bylo postupně zvyšováno testovací napětí výbojů od ± 2 kV až po ± 10 kV a bylo provedeno pět až deset výbojů pro každou polaritu. Výboje byly nejdříve aplikovány do vybíjecích ostrůvků postupně od nejvzdálenějšího po nejbližší k FCP (DUT). Po otestování kabeláže (výboje do ostrůvků) byly otestovány výboje do FCP a následně i přímo do testovaného zařízení (šrouby, konektory, pouzdro). Testování vzduchovým výbojem neproběhlo, jelikož došlo k poškození testovaného zařízení a navíc zařízení, až na umělohmotné kryty konektorů, nedisponuje nevodivými součástmi. Samotné konektory ale byly otestovány kontaktním výbojem.



Obrázek 6.3: Testovací sestava pro zkoušku odolnosti vůči ESD při měření

U výbojů ± 2 kV nebyl zaznamenán žádný náznak narušení funkce zařízení. Při ± 4 kV několikrát nastala situace, kdy došlo k výpadku komunikace. Nejčastěji k tomu docházelo při výbojích do nejbližšího vybíjecího ostrůvku od DUT. Výpadek komunikace ovšem neovlivnil chod a funkčnost zařízení. Kontaktní výboj o velikosti ± 6 kV znovu zapříčinil výpadky komunikačního vedení, a to mnohem častěji než výboj ± 4 kV. Na funkci zařízení to opět žádný vliv nemělo, a to ani při přímém výboji do DUT. Následoval výboj o velikosti ± 8 kV, při kterém komunikace vypadávala téměř při každém výboji aplikovaném jak na vybíjecí ostrůvky, tak na FCP a i do samotného DUT. Funkce zařízení ale nebyla nijak narušena. K poruše samotného zařízení došlo až při úrovni napětí výboje ± 10 kV, který byl aplikován přímo do DUT. Výboj, který zapříčinil poruchu byl konkrétně aplikován do konektorů. Co selhalo na testovaném zařízení není úplně jasné, nicméně nejspíše se jednalo o selhání izolátoru.

Zařízení bylo schopné odolávat nepřímým výbojům od ± 2 kV do ± 10 kV. Přímým výbojům velikostí od ± 2 kV do ± 8 kV odolávalo taktéž bez ztráty jeho funkce. Až při přímém výboji ± 10 kV došlo k poškození zařízení. Na základě tohoto testu a porovnání s normativními údaji bylo zařízení klasifikováno do kategorie 2 odolnosti pro přímý kontaktní výboj a pro nepřímý kontaktní výboj taktéž do kategorie 2 (dle tabulek C.1 a C.3 z normy ISO 10605).

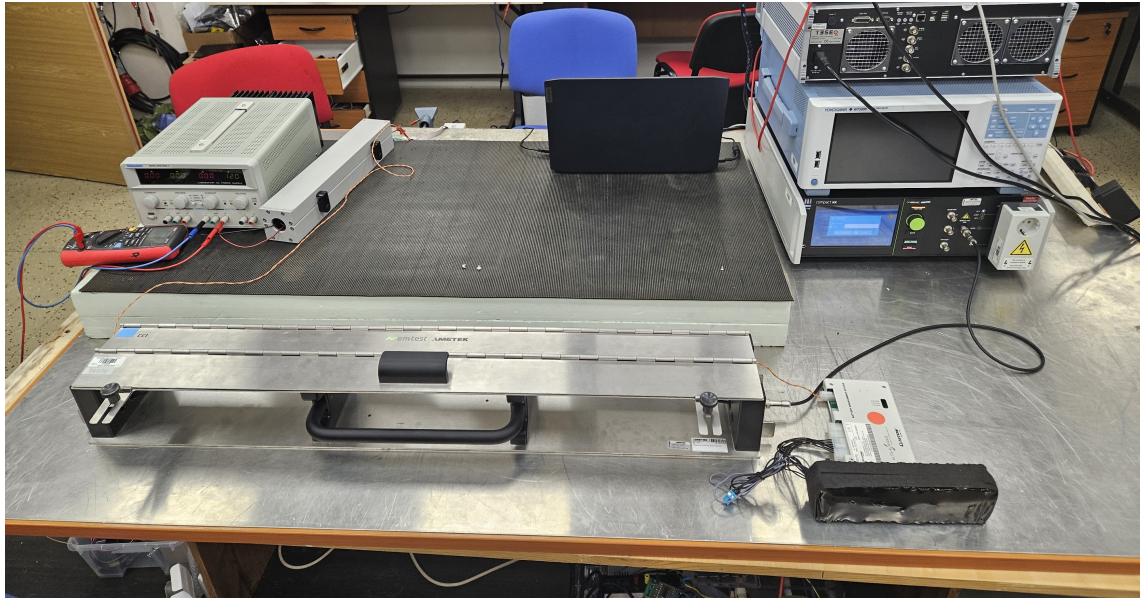
6.2.2 Zkouška odolnosti BMS jednotky vůči EFT/B v datových vodičích

Při měření bylo využito kompaktního generátoru skupin rychlých pulzů a výkonového pulzu (burst a surge). Dále kapacitní lišty a také vazební kleštiny (SCHWARZBECK Mess-Elektronik CMAD 1614). Přístroje jsou uvedeny v tabulce 6.1. Bylo provedeno testování komunikačního datového vedení. Metodika měření probíhala dle Přepisu EHK OSN č. 10 a normy ČSN EN 61000-4-4.



Obrázek 6.4: Generátor EFT/B od EMTEST s nastavenými hodnotami

Na obrázku 6.4 je vidět, že generátor byl pro komunikační datové vedení nastaven stejně jako se nastavuje po AC a DC napájecí vedení dle EHK OSN č. 10 a ČSN EN 61000-4-4. Nastaveno bylo zkušební napětí 2000 V, opakovací frekvence 5 kHz po dobu (T) 1 minuty, doba trvání jednoho impulzu byla nastavena na 5 ns a doba náběhu na 50 ns (v pravém horním rohu displeje). Doba trvání skupiny impulzů (td) byla nastavena na 15 ms a perioda skupiny impulzů (tr) byla nastavena na 300 ms. Impedance 50 Ω znázorňuje zátěž vedení.



Obrázek 6.5: Testovací sestava pro zkoušku odolnosti vůči EFT/B při měření

Při testování docházelo opět k výpadkům komunikačního datového vedení, avšak samotné zkoušené zařízení jak během testování, tak ani po něm neprokázalo žádnou ztrátu funkčních vlastností. Nedošlo tedy k žádnému zhoršení funkcí souvisejících s odolností dle EHK OSN č. 10, a tak se testované ESA v podobě BMS jednotky považuje jako vyhovující požadavkům odolnosti.

6.2.3 Měření rušení šířeného vyzařováním z BMS jednotky v komoře TEM

Měření bylo provedeno v komoře GTEM (Gigahertz transverse electromagnetic) s příčným elektromagnetickým polem (k vidění na obr. 6.6), dostupné v laboratoři EMC TUL. Ke zkoušce byly použity měřicí sondy spolu s EMI přijímačem od výrobce Rohde&Schwarz, který dokáže měřit elektromagnetické rušení na frekvencích od 10 Hz po 7 GHz. Dále bylo využito směrových odbočnic a vysokofrekvenčního přepínače. Všechny uvedené přístroje jsou v tabulce 6.1.

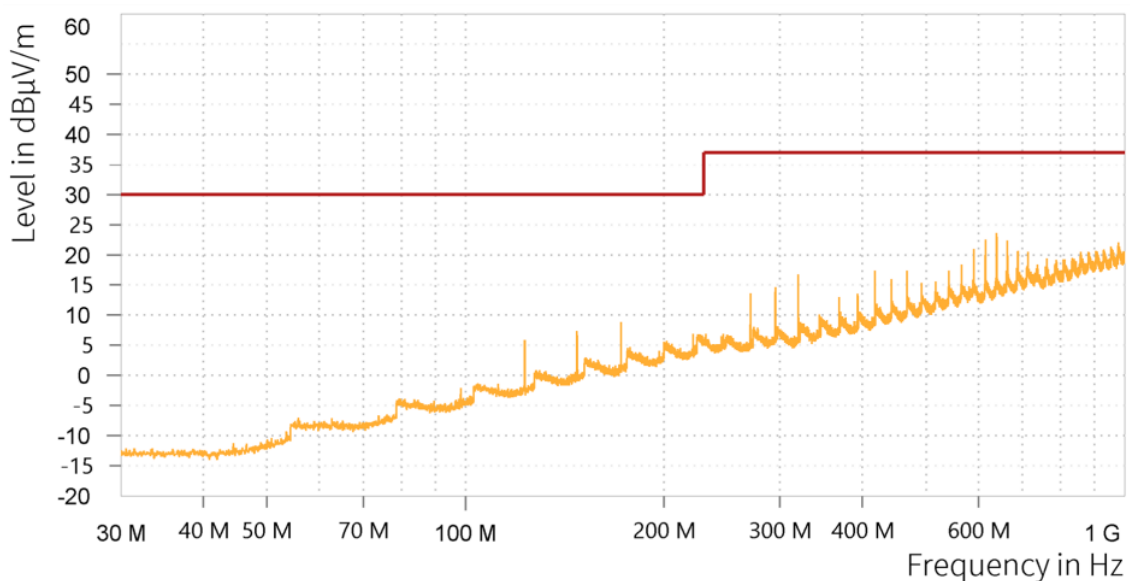


Obrázek 6.6: Komora GTEM



Obrázek 6.7: BMS jednotka umístěná na manipulátoru komory

Při zkoušce byl využit kvazi-špičkový detektor a zkouška probíhala v kmitočtovém pásmu od 30 MHz do 1 GHz. Ačkoliv byly podmínky zkoušky nastaveny dle předpisu EHK OSN č. 10, došlo k jedné významné změně oproti standardním požadavkům předpisu. Namísto použití standardních testovacích prostředí ALSE nebo OATS, byla pro realizaci testu využita GTEM komora, přičemž rušivé vyzařování nebylo měřeno ze standardní vzdálenosti jednoho metru. Místo toho bylo měření provedeno přímo v konzistentním elektromagnetickém poli, které komora umožňuje udržet.



Obrázek 6.8: Graf z měření vyzařovaného rušení (červená křivka - mez rušení pro vyzařování; oranžová křivka - naměřená úroveň vyzařovaného rušení)

Meze rušivého vyzařování v grafu na obrázku 6.8 odpovídají mezím pro obytné budovy a lehký průmysl. V automobilovém průmyslu jsou tyto meze stanoveny o několik desítek dB výše (viz obr. 5.3). Z grafu lze vyčíst, že hladina rušení šířeného zářením nepřesáhla červené meze, a z toho plyne, že rušení nemohlo přesáhnout ani meze stanovené ve standardech automobilového průmyslu. Mezi naměřeným rušením a mezemi pro automobilový průmysl je velká rezerva a rušení tedy nikdy nepřesahuje mezní hodnotu rušení stanovenou v normě, což je v souladu s jejími požadavky.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo se hlouběji seznámit s problematikou testování EMC, zejména s důrazem na testování v automobilovém průmyslu.

Rešeršní část je vypracována od úplných základů elektromagnetické kompatibility, kde je pozornost věnována zejména otázce, co tato problematika vůbec znamená, proč a jak se řeší a navíc co způsobuje. Spolu s tím souvisí i její rozdělení, popsání důležitých pojmů, měření emisivity a testování odolnosti.

Významná část rešerše je věnována testování EMC pro automobily a jsou vyhodnoceny rozdílnosti oproti testům běžných zařízení. Zvláštní pozornost je věnována normám souvisejícím s EMC, a to jak pro všeobecný průmysl, tak pro automobily.

Na závěr celé práce, v praktické části, byl dle prostudovaných norem navržen přípravek na testování odolnosti vůči ESD určený právě pro komponenty z automobilového průmyslu. Tento přípravek byl pak v závislosti na konkrétní normě využit pro demonstrativní testování v laboratoři EMC TUL. Kromě tohoto testu byly provedeny a vyhodnoceny ještě zkoušky odolnosti vůči skupinám rychlých pulzů, výkonovému pulzu a byla změřena emisivita zařízení.

Bakalářská práce vedla k identifikaci některých zkoušek z automobilového průmyslu, které by se potenciálně mohly v budoucnu provádět v laboratoři EMC TUL.

Použitá literatura

- [1] SVAČINA, Jiří. ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA [online]. 2002 [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/3284087-Elektromagneticka-kompatibilita.html>.
- [2] MUZOKAMI, Kyle. *Remembering That Time a Deadly Fire Almost Sunk the World's First 'Supercarrier': The incident marked one of the worst losses of life on a U.S. naval ship since WWII.* [online]. Popular Mechanics, 2023 [cit. 2023-12-01]. Dostupné z: <https://www.popularmechanics.com/military/navy-ships/a43253763/fire-on-aircraft-carrier-uss-forrestal/>.
- [3] LEACH R., D. a B. ALEXANDER M. Electronic Systems Failures and Anomalies Attributed to Electromagnetic Interference. *NASA Reference Publication 1374* [online]. 1995 [cit. 2023-12-01]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19960009442>.
- [4] DRÍNOVSKÝ, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) [online]. [B.r.] [cit. 2023-12-01]. Dostupné z: https://docplayer.cz/104813220-Elektromagneticka-kompatibilita-emc-jiri-drinovsky-urel-fekt-vut-v-brne.html#google_vignette.
- [5] KOČMAN, Stanislav. Základní pojmy a normalizace EMC [online]. 2017 [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: https://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/sylaby/1_Zakladni_pojmy_normalizace.pdf.
- [6] EK-INDUSTRY. *Doplnění bezpečnostních prvků stroje a jeho následná certifikace a vydání označení CE* [online]. 2022. [cit. 2024-01-21]. Dostupné z: <https://www.ek-industry.cz/14-vsechny-novinky/novinky/107-doplneni-bezpecnostnich-prvku-stroje-a-jeho-nasledna-certifikace-a-vydani-oznaceni-ce>.

- [7] DŘÍNOVSKÝ, Jiří et al. Elektromagnetická kompatibilita v automobilové technice. *Elektrorevue ISSB 1213 - 1539, svazek 14, číslo 3* [online]. 2012 [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://adoc.pub/elektromagneticka-kompatibilita-v-automobilove-technice.html>.
- [8] KELLER, Reto a Ignacio de MENDIZÁBAL. *Automotive EMC Standards - UNECE R10* [online]. Academy of EMC, 2022 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.academyofemc.com/post/automotive-emc-standards-unece-r10>.
- [9] Předpis EHK OSN č. 10 (E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.9/-Rev.5, Předpis č. 10): Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska elektromagnetické kompatibility. 2019.
- [10] ISO 10605: Road vehicles — Test methods for electrical disturbances from electrostatic discharge. 2. vyd. 2008.
- [11] RYBAK, Terence a Mark STEFFKA. AUTOMOTIVE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC). *TLFeBOOK* [online]. 2004 [cit. 2023-12-01]. ISBN 1-4020-7783-1. Dostupné z: https://www.academia.edu/35570558/Automotive_Electromagnetic_Compatibility_by_Rybak_and_Steffka.
- [12] ČSN EN IEC 55025: Vozidla, čluny a zážehové motory — Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení — Meze a metody měření pro ochranu palubních přijímačů. 4. vyd. 2022.
- [13] ČSN EN IEC 55016-1-4: Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti — Část 1-4: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti — Antény a zkušební stanoviště pro měření rušení šířeného zářením. 4. vyd. 2019.
- [14] ČSN EN IEC 55016-1-2: Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti — Část 1-2: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti — Vazební zařízení pro měření rušení šířeného vedením. 2. vyd. 2014.
- [15] ISO 11452-2 preview: Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 2: Absorber-lined shielded enclosure. 3. vyd. 2019.
- [16] ISO 11452-3 preview: Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 3: Transverse electromagnetic mode (TEM) cell. 3. vyd. 2016.

- [17] ČSN EN IEC 55016-2-1: Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti — Část 2-1: Metody měření rušení a odolnosti — Měření rušení šířeného vedením. 3. vyd. 2015.
- [18] ČSN EN 61000-4-4: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) — Část 4-4: Zkušební a měřicí technika — Rychlé elektrické přechodné jevy/skupiny impulzů - Zkouška odolnosti. 3. vyd. 2013.
- [19] MUSOLINO, Francesco a Franco L. FIORI. Modeling the IEC 61000-4-4 EFT Injection Clamp. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* [online]. 2008, roč. 50, s. 869–875 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:35827848>.
- [20] ČSN EN 61000-4-5: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) — Část 4-5: Zkušební a měřicí technika - Rázový impulz — Zkouška odolnosti. 3. vyd. 2015.
- [21] ČSN EN 61000-4-2: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) — Část 4-2: Zkušební a měřicí technika - Elektrostatický výboj — Zkouška odolnosti. 2. vyd. 2009.

Příloha A Výkres přípravku

